



TESIS - SF142502

**ANALISA STRUKTUR BAWAH PERMUKAAN TANAH  
DI SEKITAR CANDI GAMBAR WETAN, KABUPATEN  
BLITAR DENGAN METODE *VERY LOW FREQUENCY  
ELECTROMAGNETIC* (VLF-EM)**

Miftakhul Maulidina  
NRP 1113201201

DOSEN PEMBIMBING  
Prof. Dr. rer. nat. Bagus Jaya Santosa, SU

PROGRAM MAGISTER  
BIDANG KEAHLIAN GEOFISIKA  
JURUSAN FISIKA  
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM  
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER  
SURABAYA  
2015



TESIS - SF142502

# **THE SUBSURFACE STRUCTURE ANALYSIS OF GAMBAR WETAN TEMPLE, BLITAR USING VERY LOW FREQUENCY ELECTROMAGNETIC (VLF-EM) METHOD**

Miftakhul Maulidina  
1113201201

SUPERVISOR  
Prof. Dr. rer. nat. Bagus Jaya Santosa, SU

MASTER PROGRAM  
GEOPHYSICS  
PHYSICS DEPARTMENT  
FACULTY OF MATHEMATICS AND NATURAL SCIENCE  
SEPULUH NOPEMBER INSTITUTE OF TECHNOLOGY  
SURABAYA  
2015

**Tesis ini disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar  
Magister Sains (M.Si.)  
di  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember**


**oleh :**

**Miftakhul Maulidina  
NRP. 1113201201**

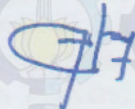
**Tanggal Ujian : 29 Mei 2015  
Periode Wisuda : September 2015**

**Disetujui oleh :**

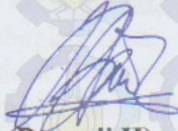
**1. Prof. Dr. rer. nat. Bagus Jaya Santosa, SU.  
NIP. 196208021987011001**

  
**(Pembimbing)**

**2. Dr. rer. nat. Eko Minarto  
NIP. 197502051999031004**

  
**(Penguji I)**

**3. Dr. Bintoro Anang Subagyo  
NIP. 197907162005011002**

  
**(Penguji II)**



**Direktur Program Pascasarjana**

**Prof. Dr. Ir. Adi Soeprijanto, MT.  
NIP. 196404051990021001**

**ANALISA STRUKTUR BAWAH PERMUKAAN TANAH  
DI SEKITAR CANDI GAMBAR WETAN,  
KABUPATEN BLITAR DENGAN METODE  
VERY LOW FREQUENCY ELECTROMAGNETIC (VLF-EM)**

**Nama** : Miftakhul Maulidina  
**NRP** : 1113201201  
**Pembimbing** : Prof. Dr. rer. nat. Bagus Jaya Santosa, SU.

**ABSTRAK**

Penelitian struktur bawah permukaan tanah di sekitar Candi Gambar Wetan yang bertempat di Desa Sumberasri, Kecamatan Nglegok, Kabupaten Blitar bertujuan untuk mengetahui anomali dan menentukan sebaran batuan bawah permukaan sekitar candi. Metode yang digunakan adalah metode *Very Low Frequency Electromagnetic* (VLF-EM). Pengambilan data di lapangan dilakukan dengan membagi area menjadi beberapa lintasan. Spasi antarlintasan sebesar 1m. Perekaman data VLF dilakukan di tiap titik pada masing-masing lintasan dengan spasi antartitik sebesar 0.5 meter. Hasil akusisi atau perekaman data VLF berupa nilai *inphase, quadrature, t-field*, dan *tilt*. Data tersebut diolah menggunakan *filtering* NA-MEMD untuk menguraikan sinyal berfrekuensi tinggi hingga rendah sehingga dapat menghilangkan *noise*. Selanjutnya, data tersebut diolah menggunakan Filter Karous Hjelt untuk interpretasi kualitatif, yaitu menentukan letak anomali yang lebih konduktif dan resistif. Selain itu, data juga diinversi menggunakan *software Inv2DVLF-v1* untuk interpretasi kuantitatif, yaitu melakukan estimasi nilai resistivitas semu berdasarkan data *inphase* dan *quadrature*. Setelah itu, keduanya digabung menjadi interpretasi keseluruhan. Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan pada 9 *line*, sebagian besar teridentifikasi anomali resistif yang diduga adalah batuan andesit dengan resistivitas berkisar 120-220  $\Omega\text{m}$  pada kedalaman 0-40 meter. Hasil penelitian ini diharapkan dapat membantu dalam menemukan arca atau sedimen-sedimen batuan yang masih terpendam di dalam tanah karena candi induknya hingga saat ini belum ditemukan.

**Kata kunci:** VLF-EM, sedimen batuan, NA-MEMD, Filter Karous Hjelt, inversi.

# **THE SUBSURFACE STRUCTURE ANALYSIS OF GAMBAR WETAN TEMPLE, BLITAR USING VERY LOW FREQUENCY ELECTROMAGNETIC (VLF-EM) METHOD**

**By : Miftakhul Maulidina**  
**Student Identity Number : 1113201201**  
**Supervisor : Prof. Dr. rer. nat. Bagus Jaya Santosa, SU.**

## **ABSTRACT**

A geophysical investigation to study anomalies and determine the distribution of rocks within the subsurface using the Very Low Frequency Electromagnetic (VLF-EM) method was conducted around Gambar Wetan temple. We have measured subsurface structure by dividing the area into several tracks. The spacing of trajectory is 1 meter. The measurement was done at each point on each trajectory with spacing of 0.5 meters. As a result, we get the data of inphase, quadrature, t-fields, and tilt. Noise-Assisted Multivariate Empirical Mode Decomposition (NA-MEMD) was applied to the data to denoise the signal of VLF-EM data. The NA-MEMD filtered data were then interpreted qualitatively using Karous-Hjelt filter to get the location of the anomaly which is more conductive or more resistive. Quantitative interpretation using Inv2DVLF-v1 for the inversion of tipper data (inphase and quadrature) were also done to get the apparent resistivity profile. Then, both were combined to get the overall interpretation. The results showed that there are generally two anomalies detected around the temple in 9 lines measurement, conductive and resistive anomaly. The resistive anomaly predicted as andesit has a resistivity 120-200  $\Omega\text{m}$  at depth of 0-40 meters. This is expected to help in finding rocks within the subsurface because the main temple has not been found.

**Key words:** VLF-EM, rock, NA-MEMD, Karous Hjelt, inversion.

## KATA PENGANTAR

### *Bismillaahirrahmaanirrahiim*

Alhamdulillah, segala puji syukur kehadirat Allah SWT yang telah melimpahkan segala rahmat dan karunia-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan tesis yang berjudul “**Analisa Struktur Bawah Permukaan Tanah Di Sekitar Candi Gambar Wetan, Kabupaten Blitar Dengan Metode *Very Low Frequency Electromagnetic (VLF-EM)***”. Shalawat serta salam senantiasa tercurahkan kepada junjungan kita Nabi besar Muhammad SAW, keluarga, sahabat dan para pengikutnya hingga akhir zaman.

Tesis ini merupakan hasil studi penelitian sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Magister Sains (M.Si.) di Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya. Penulis menyadari bahwasanya dalam menyelesaikan tesis ini tidak lepas dari peranan berbagai pihak yang telah banyak memberikan bantuan, bimbingan dan motivasi. Oleh karena itu, dalam kesempatan ini, dengan penuh rasa syukur dan do’a penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Kedua orang tuaku dan saudaraku yang telah banyak berkorban, memberikan doa, motivasi dan dorongan dalam menyelesaikan tesis ini.
2. Bapak Prof. Dr. rer. nat. Bagus Jaya Santosa, SU. selaku dosen pembimbing yang telah meluangkan waktunya untuk membimbing dan memotivasi penulis dalam menyelesaikan tesis ini.
3. Bapak Dr. rer. nat. Eko Minarto dan Bapak Dr. Bintoro Anang Subagyo selaku penguji tesis yang telah banyak memberikan saran dalam penyempurnaan tesis ini.
4. Bapak Prof. Ir. Eddy Yahya, M.Sc, Ph.D. selaku koordinator Program Magister Jurusan Fisika dan Dr. Yono Hadi Pramono, M.Eng. selaku ketua Jurusan Fisika.
5. Segenap dosen dan karyawan Jurusan Fisika di Institut Teknologi Sepuluh Nopember yang banyak memberikan kemudahan dalam belajar.

6. Pak Kis (laboran) dan Mas Sungkono yang telah banyak mengarahkan dalam pengambilan data dan analisa, serta diskusinya yang sangat bermanfaat.
7. Bapak koordinator Candi Gambar Wetan beserta tim atas bantuannya dalam akusisi data.
8. Mas Juan Pandu Gya Nur R., yang telah banyak membantu dalam pengolahan data.
9. Teman-teman seperjuangan di Pascasarjana Fisika angkatan 2013 terimakasih atas kebersamaan dan motivasinya.

Penulis menyadari sepenuhnya bahwa sebagai manusia biasa tentunya tidak luput dari kekurangan dan keterbatasan. Maka dengan segenap kerendahan hati, penulis mengharapkan saran dan kritik yang dapat menyempurnakan penulisan ini, sehingga dapat bermanfaat dan berguna untuk pengembangan ilmu pengetahuan.

Surabaya, ..... 2015

Penulis

## DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL .....	i
LEMBAR PENGESAHAN .....	iii
ABSTRAK .....	v
ABSTRACT .....	vii
KATA PENGANTAR .....	ix
DAFTAR ISI .....	xi
DAFTAR TABEL .....	xiii
DAFTAR GAMBAR .....	xv
BAB I PENDAHULUAN	
1.1. Latar Belakang .....	1
1.2. Perumusan Masalah .....	3
1.3. Tujuan Penelitian .....	4
1.4. Manfaat Penelitian .....	4
BAB II KAJIAN PUSTAKA	
2.1. Gelombang Elektromagnetik <i>Very Low Frequency</i> (VLF).....	5
2.1.1. Pengertian Metode VLF-EM .....	5
2.1.2. Pemancar .....	6
2.1.3. Sinyal VLF.....	7
2.1.4. Perambatan Medan EM.....	9
2.1.5. Fase dan Polarisasi <i>Ellips</i> .....	11
2.1.6. Pelemahan (Atenuasi) Medan .....	14
2.2. <i>Multivariate Empirical Mode Decomposition</i> (MEMD) .....	15
2.3. <i>Noise-assisted Multivariate Empirical Mode Decomposition</i> .....	17
2.4. Filter Fraser dan Karous-Hjelt .....	18
2.5. <i>Forward Modelling</i> dan Inversi .....	21
2.6. <i>Finite Element Method</i> (FEM) .....	23
2.7. Sifat Elektromagnetik Material Arkeologi.....	26
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	
3.1. Kondisi Geologi dan Lokasi Penelitian.....	29
3.2. Perangkat Penelitian.....	31



3.2.1. Peralatan .....	31
3.2.2. Perangkat Lunak.....	32
3.3. Akusisi Data .....	32
3.4. Pengolahan, Interpretasi, dan Analisa Data.....	34
BAB IV ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN	
4.1. Hasil <i>Filtering</i> NA-MEMD .....	35
4.2. Analisis, Interpretasi, dan Pembahasan Data Lapangan.....	44
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	
5.1. Kesimpulan .....	67
5.2. Saran .....	67
DAFTAR PUSTAKA.....	69

## DAFTAR TABEL

Tabel 2.1. Variasi <i>skin depth</i> .....	15
Tabel 2.2. Koefisien filter $K_{i0}^{-1}$ untuk beberapa nilai $n$ .....	20
Tabel 4.1. Perbandingan rms spasi antartitik 0,5m terhadap 1m .....	62

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1. Induksi gelombang primer terhadap benda konduktif .....	6
Gambar 2.2. Jim Creek Antena, Sheattle, US .....	7
Gambar 2.3. Arus Eddy .....	11
Gambar 2.4. Hubungan amplitude dan fase gelombang .....	12
Gambar 2.5. Polarisasi <i>ellips</i> pada bidang elektromagnetik .....	13
Gambar 2.6. Hasil penguraian sinyal oleh NA-MEMD.....	18
Gambar 2.7. Hasil penjumlahan IMF4 dan IMF5 dari Gambar 2.6. ....	18
Gambar 2.8. Hasil pengolahan menggunakan Filter Karous-Hjelt .....	20
Gambar 2.9. Perbandingan <i>forward modeling</i> dan inversi .....	21
Gambar 2.10. <i>Grid</i> untuk analisis $E_x$ .....	24
Gambar 3.1. Peta Kabupaten Blitar .....	29
Gambar 3.2. Rute Candi Gambar Wetan .....	30
Gambar 3.3. Bangunan dan arca Candi Gambar Wetan.....	31
Gambar 3.4. Peralatan akusisi data .....	32
Gambar 3.5. Spasi antarlintasan dan antartitik pengukuran .....	33
Gambar 3.6. Lintasan yang dipilih saat akusisi data .....	33
Gambar 3.7. Diagram alir pengolahan, analisa, dan interpretasi data .....	34
Gambar 4.1. Hasil dekomposisi NA-MEMD <i>line 1</i> .....	35
Gambar 4.2. Hasil rekonstruksi data lapangan VLF-EM <i>line 1</i> .....	36
Gambar 4.3. Hasil dekomposisi NA-MEMD <i>line 2</i> .....	36
Gambar 4.4. Hasil rekonstruksi data lapangan VLF-EM <i>line 2</i> .....	37
Gambar 4.5. Hasil dekomposisi NA-MEMD <i>line 3</i> .....	37
Gambar 4.6. Hasil rekonstruksi data lapangan VLF-EM <i>line 3</i> .....	38
Gambar 4.7. Hasil dekomposisi NA-MEMD <i>line 4</i> .....	38
Gambar 4.8. Hasil rekonstruksi data lapangan VLF-EM <i>line 4</i> .....	39
Gambar 4.9. Hasil dekomposisi NA-MEMD <i>line 5</i> .....	39
Gambar 4.10. Hasil rekonstruksi data lapangan VLF-EM <i>line 5</i> .....	40
Gambar 4.11. Hasil dekomposisi NA-MEMD <i>line 6</i> .....	40
Gambar 4.12. Hasil rekonstruksi data lapangan VLF-EM <i>line 6</i> .....	41

Gambar 4.13. Hasil dekomposisi NA-MEMD <i>line 7</i> .....	41
Gambar 4.14. Hasil rekonstruksi data lapangan VLF-EM <i>line 7</i> .....	42
Gambar 4.15. Hasil dekomposisi NA-MEMD <i>line 8</i> .....	42
Gambar 4.16. Hasil rekonstruksi data lapangan VLF-EM <i>line 8</i> .....	43
Gambar 4.17. Hasil dekomposisi NA-MEMD <i>line 9</i> .....	43
Gambar 4.18. Hasil rekonstruksi data lapangan VLF-EM <i>line 9</i> .....	44
Gambar 4.19. Hasil Filter Karous-Hjelt <i>inphase line 1</i> .....	45
Gambar 4.20. Hasil inversi <i>line 1</i> .....	45
Gambar 4.21. Hasil Filter Karous-Hjelt <i>inphase line 2</i> .....	47
Gambar 4.22. Hasil inversi <i>line 2</i> .....	48
Gambar 4.23. Hasil Filter Karous-Hjelt <i>inphase line 3</i> .....	49
Gambar 4.24. Hasil inversi <i>line 3</i> .....	50
Gambar 4.25. Hasil Filter Karous-Hjelt <i>inphase line 4</i> .....	51
Gambar 4.26. Hasil inversi <i>line 4</i> .....	51
Gambar 4.27. Hasil Filter Karous-Hjelt <i>inphase line 5</i> .....	52
Gambar 4.28. Hasil inversi <i>line 5</i> .....	53
Gambar 4.29. Hasil Filter Karous-Hjelt <i>inphase line 6</i> .....	54
Gambar 4.30. Hasil inversi <i>line 6</i> .....	55
Gambar 4.31. Hasil Filter Karous-Hjelt <i>inphase line 7</i> .....	55
Gambar 4.32. Hasil inversi <i>line 7</i> .....	56
Gambar 4.33. Hasil Filter Karous-Hjelt <i>inphase line 8</i> .....	57
Gambar 4.34. Hasil inversi <i>line 8</i> .....	58
Gambar 4.35. Hasil Filter Karous-Hjelt <i>inphase line 9</i> .....	59
Gambar 4.36. Hasil inversi <i>line 9</i> .....	60
Gambar 4.37. Hasil inversi <i>line 1-4</i> .....	61
Gambar 4.38. Hasil inversi <i>line 5-9</i> .....	61
Gambar 4.39. Hasil penguraian sinyal oleh NA-MEMD <i>inphase line 1</i> .....	63
Gambar 4.40. Hasil inversi spasi antartitik 1m untuk <i>line 1-6</i> .....	64
Gambar 4.41. Kondisi geologi area untuk akusisi data .....	65

# **BAB 1**

## **PENDAHULUAN**

### **1.1. Latar Belakang**

Blitar merupakan daerah yang sebagian besar wilayahnya masih terdapat banyak peninggalan sejarah di masa lalu, salah satunya adalah candi. Candi-candi yang ada di Blitar sangat banyak jumlahnya. Candi-candi tersebut ada yang ditemukan dalam keadaan utuh, namun tidak jarang ditemukan candi dalam keadaan berantakan atau tidak utuh lagi. Candi-candi tersebut ada yang ditemukan hanya beberapa bagian saja dalam waktu yang berbeda walaupun masih berada dalam satu area. Hal itu dikarenakan adanya beberapa candi lain yang masih terpendam dalam tanah. Candi-candi yang masih terpendam di dalam tanah disebabkan oleh beberapa faktor, seperti tertimbun lahar akibat letusan gunung api atau gempa bumi. Peristiwa inilah yang terjadi pada penemuan Candi Gambar Wetan di Dusun Gambar Anyar Desa Sumberasri Kecamatan Nglegok Kabupaten Blitar yang lokasinya masih berdekatan dekat Gunung Kelud yang berada di Kediri. Wilayah Nglegok adalah wilayah perbatasan antara Kediri dan Blitar. Gunung Kelud merupakan gunung api yang masih aktif dan letusannya banyak mengeluarkan material vulkanik yang bisa menimbun daerah sekitarnya. Candi Gambar Wetan pertama kali ditemukan pada tahun 1983. Pada saat itu hanya ditemukan satu arca. Kemudian pada tahun-tahun berikutnya ditemukan sebuah arca lagi di daerah yang tidak jauh dari penemuan arca yang pertama. Setelah itu ditemukan kembali peninggalan purbakala di sekitar daerah tersebut semacam tempat peribadatan masyarakat Hindu pada zaman dahulu. Penemuan terbaru pada bulan Mei 2014 yaitu sebuah arca di dekat tempat penemuan yang ketiga tadi. Oleh karena itu, perlu adanya sebuah penelitian di area sekitar Candi Gambar Wetan untuk mengidentifikasi kedalaman dan struktur lapisan bawah tanah sekitar candi. Penelitian ini pada prinsipnya mengidentifikasi ada tidaknya batuan dalam tanah melalui nilai resistivitas bawah permukaan tanah. Resistivitas tanah berkaitan dengan berbagai parameter geologi seperti mineral dan konten cairan, porositas, derajat patahan, persentase patahan yang terisi air tanah, dan derajat

saturasi air di batuan (Singh, 2004). Hasil penelitian ini diharapkan dapat membantu untuk menemukan peninggalan purbakala lainnya di area Candi Gambar Wetan karena candi induknya masih belum ditemukan sampai saat ini.

Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode *Very Low Frequency Electromagnetic* (VLF-EM). Data yang direkam dalam pengukuran VLF-EM adalah *inphase*, *quadrature t-field* dan *tilt*. Selanjutnya data tersebut diolah secara kualitatif dan kuantitatif. Sebelum diolah, data tersebut difilter terlebih dahulu menggunakan NA-MEMD untuk menghilangkan *noise* berfrekuensi tinggi melalui penguraian sinyal. Selanjutnya, hasil dari NA-MEMD diproses menggunakan Filter Karous-Hjelt yang merupakan penyempurnaan dari Filter Fraser untuk menunjukkan letak anomali. Anomali yang dimaksud dalam hal ini adalah perbedaan resistivitas dalam tanah apabila terdapat batuan di dalamnya yang tidak lain batuan tersebut adalah arca-arca yang masih tertimbun di sekitar candi. Adanya anomali tersebut karena resistivitas batuan lebih besar daripada resistivitas tanah di sekitarnya (Telford, 1990). Metode VLF-EM dapat digunakan untuk mengenali dengan cepat beda resistansi yang *exist* pada batuan beku dan sedimennya (Abbas, et.al., 2012) sehingga bermanfaat dalam upaya menggali informasi tentang kondisi geologi bawah permukaan tanah di sekitar candi sehingga dapat memprediksi susunan batuan candi lainnya yang masih terkubur di dalam tanah.

Keuntungan menggunakan metode *Very Low Frequency Electromagnetic* (VLF-EM) antara lain alatnya mudah digunakan karena beratnya ringan, cepat merekam data, dan ramah lingkungan. Alat ini cocok digunakan untuk medan terjal seperti area sekitar Candi Gambar Wetan yang terletak dekat dengan perkebunan kopi dan tebing-tebing tinggi. Metode VLF termasuk metode elektromagnetik pasif yang bekerja pada frekuensi 15-30 KHz (McNeill dan Labson, 1993). Frekuensi yang cukup rendah ini menyebabkan gelombang tersebut memiliki penetrasi yang cukup dalam. Gelombang ini menjalar ke seluruh dunia dengan atenuasi yang kecil dalam pandu gelombang antara permukaan bumi dan ionosfer. Metode ini juga sangat berguna dalam menyelidiki sifat fitur geologi dangkal pada resolusi tinggi (Aina dan Emofurieta, 1991). Metode ini telah dibuktikan keberhasilannya dalam beberapa penelitian di antaranya digunakan

dalam eksplorasi air tanah, mineral konduktif, dan *ore bodies* dalam berbagai jenis batu induk (Arcone, 1978; Paal, 1968), dalam studi panas bumi (Baranwal dan Sharma, 2006; Zlotnicki dkk, 2006), dan masalah-masalah arkeologi (Drahor, 2006).

Data yang direkam dalam metode VLF-EM efektif untuk pemetaan resistivitas. Bayrak (2002) menjelaskan bahwa memanfaatkan Filter Fraser (1969) dan Karous-Hjelt (1983) pada metode ini dapat digunakan untuk melokalisir letak bahan tambang yang lebih konduktif pada daerah observasi. Filter Karous-Hjelt merupakan penyempurnaan dari Filter Fraser. Hasil analisa ini merupakan analisa kualitatif. Santos et.al, (2006) memperkenalkan analisis kuantitatif data VLF dengan menggunakan inversi data *tipper* (*inphase* dan *quadrature*). Hasilnya berupa nilai resistivitas 2-D yang dapat mencitrakan struktur bawah permukaan dengan baik. Namun demikian, analisis kuantitatif ini memerlukan informasi analisis kualitatif untuk desain *input* awal (Bahri et.al., 2008). Dengan mengintegrasikan analisa data kualitatif dan kuantitatif diharapkan dapat menganalisa kondisi geologi dengan lebih baik. Berdasarkan paparan tersebut maka penulis bermaksud melakukan penelitian yang berjudul “Analisa Struktur Bawah Permukaan Tanah Di Sekitar Candi Gambar Wetan, Kabupaten Blitar Dengan Metode *Very Low Frequency Electromagnetic* (VLF-EM)”.

## **1.2. Perumusan Masalah**

Rumusan masalah dalam penelitian ini sebagai berikut:

1. Bagaimana anomali di bawah permukaan tanah di sekitar candi berdasarkan hasil pengukuran VLF-EM?
2. Bagaimana hasil interpretasi pengukuran VLF-EM untuk sebaran batuan di bawah permukaan tanah?

### **1.3. Tujuan Penelitian**

Penelitian ini bertujuan untuk:

1. Mengidentifikasi anomali di bawah permukaan tanah di sekitar candi berdasarkan hasil pengukuran VLF-EM.
2. Menentukan sebaran batuan bawah tanah berdasarkan hasil interpretasi pengukuran VLF-EM.

### **1.4. Manfaat Penelitian**

Manfaat penelitian ini antara lain mendapatkan pengetahuan mengenai struktur bawah tanah sekitar candi dan menambah informasi mengenai sebaran batuan yang strukturnya sama dengan candi yang nantinya dapat dijadikan referensi dalam melakukan penggalian untuk menemukan sisa-sisa arca yang masih tertimbun dalam tanah.



## **BAB 2**

### **KAJIAN PUSTAKA**

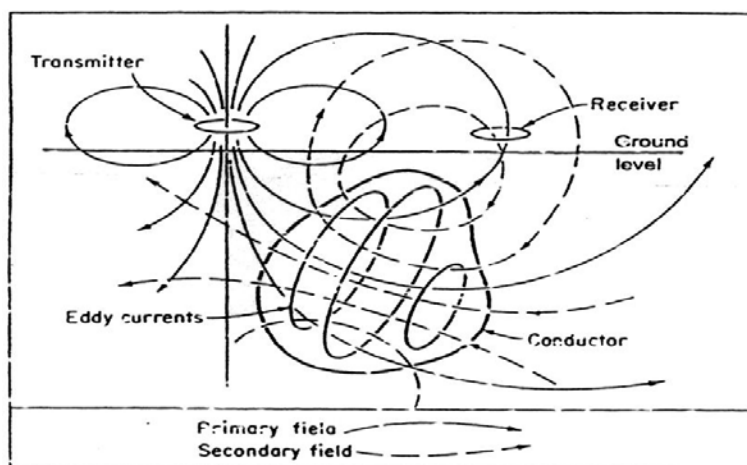
#### **2.1. Gelombang Elektromagnetik *Very Low Frequency (VLF-EM)***

##### **2.1.1. Pengertian Metode VLF-EM**

Metode VLF-EM (*Very Low Frequency-Electromagnetic*) merupakan metode geofisika dekat permukaan dengan memanfaatkan target anomali geofisika yang bersifat konduktif, misalnya lapisan batuan beku, patahan pada suatu sistem pelapisan bumi (Fernando, 2006). Metode VLF-EM bekerja dengan memanfaatkan pemancar radio dengan frekuensi sekitar 5- 30 kHz (McNeill dan Labson, 1993) sebagai medan primer dan pemancar gelombang radio yang berdaya besar sekitar 100-1000 kW (Bayrak, 1995). Penggunaan variabel besaran frekuensi dan daya pada pemancar gelombang radio tersebut sering dipakai dalam eksplorasi geofisika. Oleh karena itu, mekanisme kerja VLF-EM yang memanfaatkan pancaran gelombang radio dan pemancar VLF akan menginduksi sistem pelapisan bumi yang konduktif.

Kedalaman jangkauan dari penetrasi radiasi gelombang ini dinyatakan dengan faktor *skin depth* (yang ditentukan oleh kondisi lingkungan di sekitar lokasi pengukuran). Kedalaman penetrasi semakin rendah pada lingkungan yang semakin konduktif. Metode ini sangat efektif untuk memisahkan anomali massa yang memiliki perbedaan konduktivitas yang signifikan terhadap lingkungan sekitarnya, atau pada kondisi *overburden mass* (lapisan penutup) yang relatif dangkal (Sharma 1997).

Metode VLF-EM memanfaatkan gelombang pembawa (*carrier wave*) dari pemancar yang dibuat oleh militer untuk komunikasi bawah laut. Mengingat frekuensinya yang cukup rendah, gelombang ini juga menjalar ke seluruh dunia dengan atenuasi yang kecil dalam pandu gelombang suara antara permukaan bumi dan ionosfer.



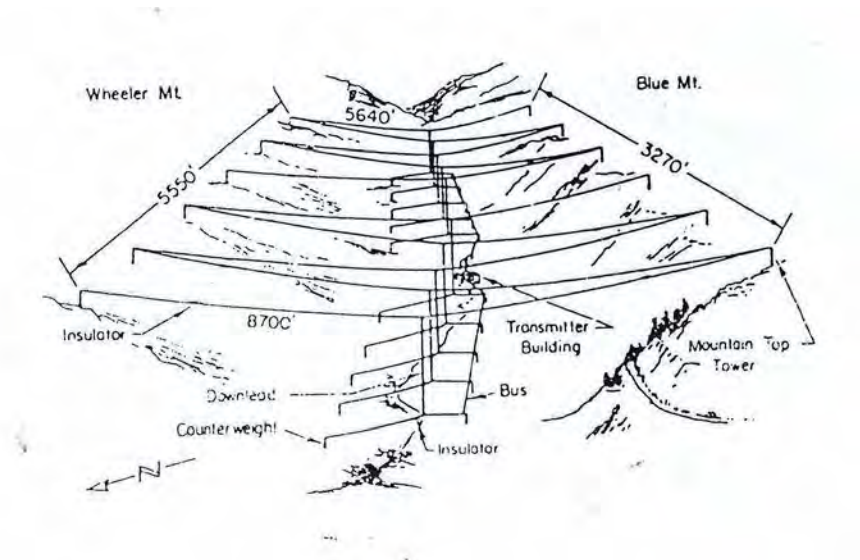
Gambar 2.1. Induksi gelombang primer terhadap benda konduktif  
(Reynold, 1997)

Adanya induksi gelombang primer menyebabkan timbulnya arus induksi di dalam medium (Gambar 2.1). Arus induksi (*Eddy Current*) inilah yang menimbulkan medan sekunder yang dapat ditangkap di permukaan. Besarnya kuat arus EM sekunder ini sebanding dengan besarnya daya hantar listrik batuan ( $\sigma$ ), sehingga dengan mengukur kuat medan pada arah tertentu, secara tidak langsung kita dapat mendeteksi daya hantar listrik batuan di bawahnya.

### 2.1.2 Pemancar

Pembangunan pemancar VLF dimulai pada awal Perang Dunia I pada tahun 1910 untuk komunikasi jarak jauh. Komunikasi dengan frekuensi VLF ini kemudian diperkuat hingga dapat digunakan untuk komunikasi *sub-marine* yaitu kapal selam. Pancaran gelombang VLF oleh suatu stasiun radio VLF akan menginduksi sistem pelapisan bumi yang konduktif. Keuntungan pemakaian gelombang VLF adalah kemampuannya untuk komunikasi global karena pelemahan yang sangat kecil di dalam pandu gelombang bumi-ionosfer dan penetrasinya cukup efektif hingga dapat menembus laut dalam. Dua pemancar terdekat dengan Indonesia berada di Yosamai, Jepang dan Northwest Cape, Australia.

Antena pemancar terdiri dari beberapa menara tinggi (200-300) m. Ukuran tinggi menara tersebut jauh lebih kecil dari panjang gelombang yang terpancar (10.000 – 20.000) m, sehingga pada jarak cukup jauh sistem antena tersebut dapat dipandang sebagai *dipole* listrik vertikal dengan arus listrik yang mengalir dari dan ke kutub-kutubnya. Secara fisik, ukuran luas antena VLF sangatlah besar yaitu sekitar 10 km<sup>2</sup>. Ukuran luas yang cukup lebar tersebut dimaksudkan untuk meningkatkan kapasitansi input dari pemancar tunggal VLF. Gambar 2.2. menunjukkan ilustrasi transmitter raksasa VLF NLK di Seattle, US yang dibangun pada lembah dua bukit.



Gambar 2.2. Jim Creek Antena, Sheattle, US  
(Sumber: Panduan Workshop Ekplorasi Geofisika UGM, 2011)

### 2.1.3 Sinyal VLF

Sinyal VLF yang dipancarkan oleh pemancar VLF mempunyai daya radiasi tertentu. Besar daya radiasi pemancar VLF (Watt,1967) dapat didekati dengan (dalam Watt):

$$P \cong 7 \times 10^{-13} V^2 C^2 h_e^2 f^4 \quad (2.1)$$

dengan V adalah tegangan yang melalui antena, C adalah kapasitansi antena termasuk di puncaknya,  $h_e$  adalah ketinggian efektif antena (dapat didekati dengan ketinggian sebenarnya  $h$ ) dan  $f$  adalah frekuensi yang dioperasikan.

Sedangkan harga komponen medan listrik dan medan magnet pada jarak tertentu dari pemancar dengan asumsi tanah adalah penghantar sempurna dan datar:

$$E_z = 9,5 \frac{\sqrt{P}}{r} \quad (2.2)$$

$$H_\phi = \frac{E_z}{\eta_0} \quad (2.3)$$

dimana P adalah daya radiasi dari pemancar (dalam Watt),  $E_z$  adalah harga puncak medan listrik (dalam Volt per meter),  $H_\phi$  adalah harga puncak medan magnet (dalam ampere per meter), r adalah jarak dari pemancar (dalam meter) dan  $\eta_0$  adalah impedansi intrinsik ruang hampa ( $120 \pi$  ohm).

Pada kondisi bumi yang sebenarnya, pengandaian di atas tidak tepat. Ada beberapa faktor utama yang berpengaruh harus dipertimbangkan, yaitu bumi adalah bulat (sferis) bukan datar (flat) dan dikelilingi oleh ionosfer. Efek dari bumi sferis ini mengakibatkan semakin berkurangnya sinyal yang dipancarkan. Sedangkan ionosfer mengakibatkan sinyal VLF dapat dideteksi pada jarak yang jauh. Hal ini disebabkan oleh keberadaan elektron bebas dalam ionosfer menyebabkan reaksi sebagai lapisan pemantul pada frekuensi VLF.

Sumber gangguan (*noise*) dalam penerimaan sinyal VLF disebabkan oleh beberapa faktor. Sumber *noise* yang utama adalah radiasi medan elektromagnetik akibat kilat atmosfer balik di tempat yang dekat/ jauh dengan lokasi pengukuran. Pada frekuensi VLF, radiasi medan ini dapat melemahkan sinyal yang dipancarkan oleh pemancar. Di Indonesia gangguan (*noise*) ini cukup banyak. Gangguan ini dicirikan dengan naiknya kuat medan listrik vertikal dan kuat medan magnet horizontal secara tiba-tiba (jika sumber medan cukup dekat dengan pengukur) dan relatif berbentuk *Gaussian* jika sumber medan cukup jauh. *Noise* kedua adalah variasi diurnal medan elektromagnetik bumi, dimana terjadi pergerakan badai dari arah timur ke barat yang terjadi pada siang hari hingga sore hampir malam. *Noise* harian minimum berada pada jam 08.00 waktu lokal, kemudian merambat naik hingga maksimum pada jam 16.00 waktu lokal.

#### 2.1.4. Perambatan Medan EM

Medan elektromagnetik yang merambat pada konduktivitas batuan  $\sigma$ , permitivitas dielektrik  $\epsilon$ , dan permeabilitas  $\mu$  berlaku persamaan Maxwell yang ditulis dalam domain frekuensi:

$$\nabla \times \mathbf{H} = (\sigma + i\omega\epsilon)\mathbf{E} \quad \text{Hukum Ampere} \quad (2.4a)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -(i\omega\mu_0)\mathbf{H} \quad \text{Hukum Faraday} \quad (2.4b)$$

$$\nabla \cdot (\epsilon\mathbf{E}) = q \quad \text{Hukum Gauss} \quad (2.4c)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{H} = 0 \quad (2.4d)$$

dimana  $\mathbf{E}e^{i\omega t}$  dan  $\mathbf{H}e^{i\omega t}$  masing-masing merupakan vektor medan listrik dan medan magnet, fungsi waktu  $t$  dengan frekuensi sudut  $\omega$  dan  $q$  merupakan densitas muatan (Kalscheur et.al., 2008). Pada persamaan (2.4a) bagian kanan terdapat kuantitas  $\mathbf{J}_{cond} = \sigma\mathbf{E}$ ,  $\mathbf{J}_{disp} = i\omega\epsilon\mathbf{E}$ , dan  $\mathbf{J} = (\sigma + i\omega\epsilon)\mathbf{E}$  masing-masing merupakan rapat arus konduksi, *displacement*, dan total. Rapat arus *displacement*  $i\omega\epsilon\mathbf{E}$  menggambarkan efek dielektrik elektronik, atomic, molecular, dan perubahan ruang polarisasi bahan dengan permitivitas dielektrik  $\epsilon$  akibat medan listrik sebagai fungsi waktu. Persamaan (2.4a) dan (2.4b) dijabarkan menjadi persamaan (2.5a) dan (2.5b) berikut ini:

$$\left(\frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z}\right)\hat{i} + \left(\frac{\partial H_x}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial x}\right)\hat{j} + \left(\frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y}\right)\hat{k} = (\sigma + i\omega\epsilon)(E_x\hat{i} + E_y\hat{j} + E_z\hat{k}) \quad (2.5a)$$

$$\left(\frac{\partial E_z}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial z}\right)\hat{i} + \left(\frac{\partial E_x}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial x}\right)\hat{j} + \left(\frac{\partial E_y}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial y}\right)\hat{k} = -i\omega\mu(H_x\hat{i} + H_y\hat{j} + H_z\hat{k}) \quad (2.5b)$$

Selanjutnya diasumsikan gelombang datar adalah gelombang yang miring terhadap permukaan bumi pada bidang y-z dan arah sumbu x adalah arah strike geolistriknya. Oleh karena itu admitivitas  $(\sigma + i\omega\epsilon)$  dan komponen medan EM hanya bervariasi pada arah y dan z. Pemilihan ini terkait dengan definisi *Transverse Electric* (TE) dan *Transverse Magnetic* (TM) yang mana komponen medan vertikal elektrik dan magnetik hilang.

Berdasarkan persamaan (2.5a) dan (2.5b) yang berlaku pada kasus 2-D ( $\partial/\partial_x = 0$ ), maka hasil pembagian TE dan TM seperti pada persamaan (2.6a) dan (2.6b) adalah:

$$\frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z} = (\sigma + i\omega\epsilon)E_x$$

$$\frac{\partial E_x}{\partial z} = -i\omega\mu H_x \quad \text{TE mode} \quad (2.6a)$$

$$\frac{\partial E_x}{\partial y} = i\omega\mu H_z$$

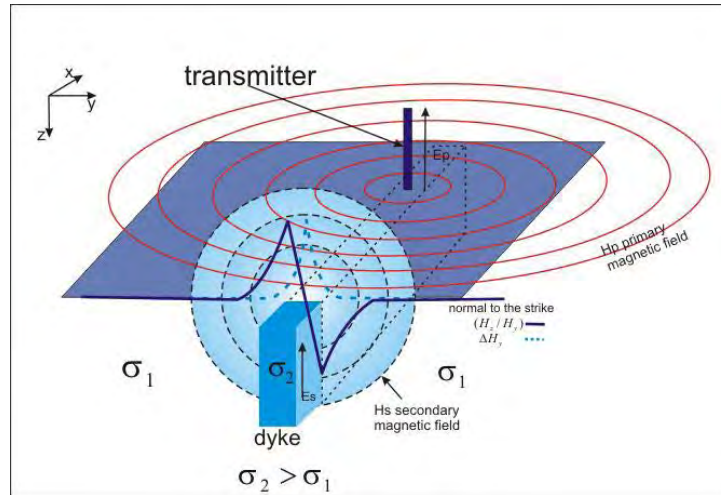
$$\frac{\partial E_z}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial z} = (\sigma + i\omega\epsilon)H_x$$

$$\frac{\partial H_x}{\partial z} = (\sigma + i\omega\epsilon)E_y \quad \text{TM mode} \quad (2.6b)$$

$$\frac{\partial H_x}{\partial y} = (\sigma + i\omega\epsilon)E_z$$

Menurut Kalscheuer et.al., (2008), penjalaran gelombang pada alat *Very Low Frequency* (VLF) termasuk dalam mode TE saja. Hal ini disebabkan *output* pada alat VLF berupa data *tipper* ( $H_z/H_y$ ) berbilangan kompleks akibat polarisasi antara  $H_z$  dan  $H_y$  yang berbentuk *ellips* atau lingkaran. Berbentuk *ellips*, jika  $H_z$  dan  $H_y$  besarnya tidak sama dan berbentuk lingkaran jika besarnya  $H_z$  dan  $H_y$  sama. Bagian *real* data triper disebut dengan *inphase*, sedangkan bagian *imaginer* disebut *quadrature*. Data *tipper* ini cocok untuk memetakan perbedaan konduktivitas secara lateral dan kurang bagus untuk perbedaan konduktivitas secara vertikal (Simson dan Bahr, 2005). Jika di bawah permukaan terdapat suatu medium yang konduktif, maka komponen medan magnetik dari gelombang elektromagnetik primer akan menginduksi medium tersebut sehingga menimbulkan arus induksi (*Edy Current*).

Arus Eddy (seperti yang diperlihatkan pada Gambar 2.3) akan menimbulkan medan elektromagnetik baru yang disebut medan elektromagnetik sekunder,  $H_s$ , yang mempunyai komponen horizontal dan komponen vertikal. Medan magnetik ini mempunyai bagian yang sefase (*inphase*) dan berbeda fase (*quadrature*) dengan medan primer. Adapun besar medan elektromagnetik sekunder sangat tergantung dari sifat konduktivitas benda di bawah permukaan.



Gambar 2.3. Arus Eddy menimbulkan medan elektromagnetik baru yang disebut medan elektromagnetik sekunder (Bosch dan Muller, 2001)

#### 2.1.5. Fase dan Polarisasi *Ellips*

Gelombang primer yang masuk ke dalam medium akan menimbulkan gaya gerak listrik (GGL) induksi  $e_s$  dengan frekuensi yang sama, tetapi fasenya tertinggal  $90^\circ$ . Gambar 2.4 menunjukkan diagram vektor antara medan primer **P** dan GGL induksinya,  $e_s$ . Apabila  $Z$  adalah impedansi efektif sebuah konduktor dengan tahanan  $R$  dan induktansi  $L$  kemudian besarnya didefinisikan sebagai:

$$Z = R + i\omega L \quad (2.7)$$

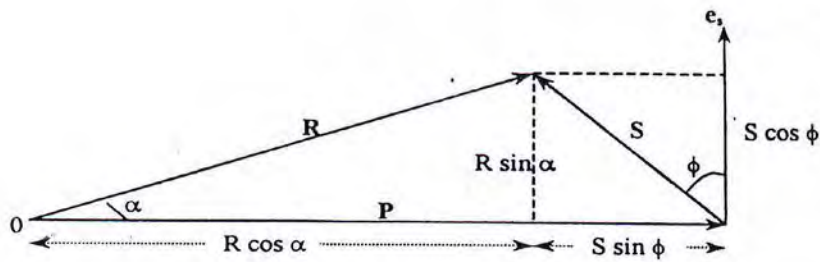
maka arus induksi  $I_s$  yang didefinisikan sebagai:

$$I_s = e_s/Z \quad (2.8)$$

akan menjalar dalam medium dan menghasilkan medan sekunder **S**. Medan **S** tersebut memiliki fase tertinggal sebesar  $\phi$  yang besarnya tergantung dari sifat kelistrikan medium. Besarnya  $\phi$  ditentukan dari persamaan berikut:

$$\tan \phi = \omega L/R \quad (2.9)$$

sehingga total beda fase antara medan **P** dan **S** akan menjadi  $90^\circ + \tan^{-1}(\omega L/R)$ .



Gambar 2.4. Hubungan amplitude dan fase gelombang sekunder (S) dan primer (P)  
(Sumber: Panduan Workshop Ekplorasi Geofisika UGM, 2011)

Apabila terdapat medium yang sangat konduktif atau resistansinya mendekati nol ( $R \rightarrow 0$ ) maka beda fasenya mendekati  $180^\circ$  dan jika medium sangat resistif atau resistansinya mendekati tak hingga ( $R \rightarrow \infty$ ) maka beda fasenya mendekati  $90^\circ$ . Kombinasi antara **P** dan **S** akan membentuk resultan **R**. Komponen **R** yang sefase dengan **P** ( $R \cos \alpha$ ) disebut sebagai komponen *real (in-phase)* dan komponen yang tegak lurus ( $R \sin \alpha$ ) disebut komponen *imaginer (out-of-phase)*. Komponen *out-of-phase* ini sering disebut sebagai komponen *quadrature*. Perbandingan antara komponen *real* dan *imaginer* dinyatakan dalam persamaan:

$$\frac{Re}{Im} = \tan \phi = \frac{\omega L}{R} \quad (2.10)$$

Berdasarkan persamaan (2.10) terlihat bahwa besarnya perbandingan  $Re/Im$  sebanding dengan besar sudut fasenya. Semakin besar perbandingan  $Re/Im$  (semakin besar pula sudut fasenya), maka konduktor semakin baik. Begitu pula sebaliknya, semakin kecil perbandingan  $Re/Im$  maka konduktor semakin buruk.

Dalam pengukurannya, alat VLF akan menghitung parameter sudut *tilt (tilt angle)* dan eliptisitas dari pengukuran komponen *in-phase* dan *out-of-phase* medan magnet vetikal terhadap komponen horizontalnya. Sudut *tilt* merupakan kemiringan sumbu utama terhadap bentuk polarisasi *ellips*. Sedangkan eliptisitas merupakan rasio sumbu minor dan sumbu mayor *ellips*. Besarnya sudut *tilt* akan sama dengan perbandingan  $H_z/H_x$  dari komponen *in-phase* sedangkan besarnya eliptisitas  $\epsilon$  sama dengan perbandingan komponen *out-of-phase* atau *quadrature*. Jika medan magnet horizontal adalah  $H_x$  dan medan vertikalnya sebesar  $H_z$

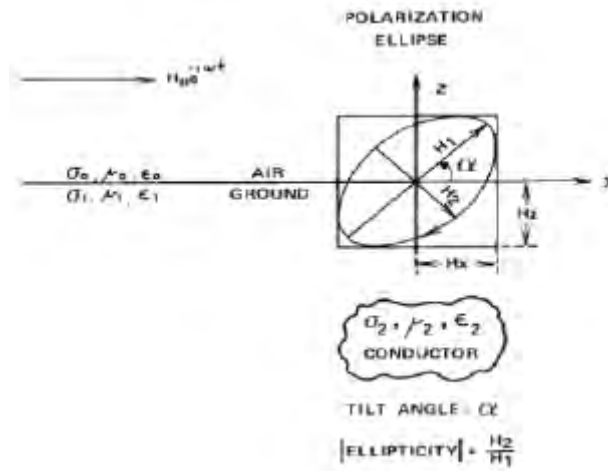


(Gambar 2.4),  $\Delta\phi = \phi_z - \phi_x$  adalah beda sudut,  $\phi_z$  dan  $\phi_x$  masing-masing merupakan sudut medan magnet komponen vertikal dan horizontal, maka besar sudut *tilt* ( $\alpha$ ) diberikan oleh persamaan berikut:

$$\tan(\alpha) = \frac{2\frac{H_z}{H_x} \cos \Delta\phi}{1 - \left(\frac{H_z}{H_x}\right)^2} \quad (2.11)$$

dan eliptisitasnya diberikan sebagai:

$$\varepsilon = \frac{H_2}{H_1} = \frac{H_z H_x \sin \Delta\phi}{(H_z e^{i\phi} \sin \alpha + H_x \cos \alpha)^2} \quad (2.12)$$



Gambar 2.5. Polarisasi *ellips* pada bidang elektromagnetik (Srigutomo, et.al., 2005)

Selanjutnya, persamaan (2.6a) saling disubstitusikan sehingga menghasilkan Helmholtz (Kalscheur et.al., 2008):

$$\frac{\partial^2 E_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 E_x}{\partial z^2} = (i\mu\omega)(\sigma + i\omega\epsilon)E_x \quad (2.13)$$

Untuk memodelkan besaran  $E_x$  pada setiap kedalaman dan posisi lateral, sulit dilakukan secara analitik. Oleh karena itu, Kalscheur et.al., (2008) menganalisis persamaan tersebut dengan menggunakan *Finite Difference* atau beda hingga, sedangkan Santos et.al., (2006) dan Srigutomo et.al., (2005) menggunakan *Finite Element Methode*. Kedua analisis ini merupakan bentuk penyederhanaan penalaran gelombang  $E_x$  saja. Walaupun demikian, kedua pendekatan tersebut cukup valid untuk mengestimasi penalaran gelombang elektromagnetik. Setelah  $E_x$  diketahui, selanjutnya dilakukan estimasi atas  $H_y$  dan

$H_z$  yang merupakan hasil differensial dari  $E_x$ . Setelah ketiga parameter tersebut didapatkan, maka dilakukan estimasi nilai resistivitas semu dan fase. Persamaan resistivitas semu dan fase sebagai berikut:

$$\rho_a^{xy} = \frac{1}{\omega\mu} |Z_{xy}|^2 \quad \text{dan} \quad \phi^{xy} = \arg(Z_{xy}) \quad (2.14)$$

$$\text{dengan} \quad Z_{xy} = \frac{E_x}{H_y} \quad (2.15)$$

### 2.1.6. Pelemahan (Atenuasi) Medan

Gelombang bidang yang merambat ke bawah pada sebuah medium dengan konduktivitas  $\sigma$ , dimana medan  $\mathbf{E}$  berorientasi pada sumbu x dan medan  $\mathbf{H}$  pada sumbu y akan memberikan solusi:

$$E_x = E_0 e^{-ikz} = E_0 e^{-i(\beta + i\alpha)z} \quad (2.16)$$

dengan k adalah parameter atau angka gelombang dan diberikan oleh persamaan sebagai berikut:

$$k^2 = -i\omega\mu(\sigma + i\omega\varepsilon) \quad (2.17)$$

Parameter *real*  $\beta$  menunjukkan faktor fase (rad/m) dan parameter *imaginer*  $\alpha$  menunjukkan faktor atenuasi/pelemahan gelombang (dB/m). Pada medium batuan, harga konduktivitas dibagi dengan permitivitas listrik dan frekuensi angulernya sangat lebih besar daripada satu, maka faktor fase dan faktor atenuasi bernilai sama (Kaikkonen, 1979).

Kedalaman pada saat amplitudo menjadi  $1/e$  (sekitar 37%) dikenal sebagai kedalaman kulit atau *skin depth* ( $\delta$ ). Kedalaman ini di dalam metode elektromagnetik sering dianggap sebagai kedalaman penetrasi gelombang yang dirumuskan sebagai:

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\sigma}} \approx 504 \sqrt{\frac{\rho}{f}} \quad (2.18)$$

Implementasi persamaan diatas dapat dilihat pada Tabel 2.1

Tabel 2.1: Variasi *skin depth* dengan frekuensi gelombang bidang pada medium homogen dengan resistivitas  $\rho$

<i>Skin Depth (m)</i>				
<b>f (Hz)</b>	<b>Resistivitas (<math>\Omega\text{m}</math>)</b>			
	<b>0.01</b>	<b>1</b>	<b><math>10^2</math></b>	<b><math>10^4</math></b>
<b>0.01</b>	500	5000	$5 \times 10^4$	$5 \times 10^5$
<b>10</b>	16	160	1600	16000
<b><math>10^3</math></b>	1.6	16	160	1600
<b><math>10^4</math></b>	0.5	5	50	500
<b><math>10^5</math></b>	0.16	1.6	16	160

(Sumber: Panduan Workshop Ekplorasi Geofisika UGM, 2011)

## 2.2. Multivariate Empirical Mode Decomposition (MEMD)

MEMD merupakan perluasan *multivariate* (multivariabel) dari *empirical mode decomposition* (EMD) standar (Rehman dan Mandic, 2010). EMD pertama kali diusulkan oleh Huang dkk (1998). Ini adalah metode adaptif untuk menganalisis data nonlinier dan nonstasioner, menguraikan data ke dalam satu set mode osilasi yang diberi nama *Intrinsic Mode Function* (IMF). Lebih khususnya, untuk sebuah sinyal  $x(t)$  EMD menemukan  $K$  IMF  $c_1(t)$ ,  $c_2(t)$ , ...,  $c_K(t)$  dan sebuah sinyal residu  $r(t)$ , sehingga:

$$x(t) = \sum_i^K c_i(t) + r(t) \quad (2.19)$$

Setelah penemuan tersebut, banyak varian EMD telah diusulkan dan perluasan *multivariate* merupakan arah penelitian yang penting. MEMD baru-baru ini telah diusulkan oleh Rehman dan Mandic (2010) untuk memproses sinyal *multivariate* yang memiliki jumlah *channel* yang sembarang.

Langkah penting untuk MEMD adalah perhitungan rata-rata lokal. Selain itu, gagasan "model osilasi" mendefinisikan IMF sedikit membingungkan untuk data spasial *multivariate*. Untuk mengatasi masalah ini, Rehman dan Mandic (2010) membuat beberapa *envelope* n-dimensi dengan mengambil proyeksi dari beberapa *input* di sepanjang arah yang berbeda di ruang n-dimensi. IMF dihitung dengan menggunakan *envelope*.

Dengan menganggap  $V(s) = \{v_1(s), v_2(s), \dots, v_n(s)\}$  adalah sekumpulan  $n$  data spasial sebagai fungsi ruang ( $s$ ) dan  $X^{\theta_k} = \{x_1^k, x_2^k, \dots, x_n^k\}$  menunjukkan arah vektor sepanjang arah yang diberikan oleh sudut dalam satu set arah,  $X(k = 1, 2, \dots, K, K$  adalah jumlah arah). Kemudian, dari IMF kemudian set data spasial dapat diperoleh dengan menggunakan algoritma 1 (Rehman dan Mandic, 2010):

Algoritma 1: MEMD

1. Bangkitkan sekumpulan vektor arah yang sesuai  $X$ .
2. Hitunglah sebuah proyeksi,  $p^{\theta_k}(s)$ , dari sekumpulan data spasial  $V(s)$  sepanjang vektor arah  $X^{\theta_k}$ , untuk semua nilai  $k$ .
3. Temukan sesaat spasial  $s_i^{\theta_k}$  yang sesuai dengan *maxima* proyeksi untuk semua nilai  $k$ .
4. Interpolasikan  $[s_i^{\theta_k}, V(s_i^{\theta_k})]$  untuk memperoleh kurva *multivariate envelope*  $e^{\theta_k}(s)$  untuk semua nilai  $k$ .
5. Rerata  $M(s)$  dari kurva *envelope* dihitung dengan  $M(s) = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K e^{\theta_k}(s)$ .
6. Ekstrak “*detail*”  $D(s)$  menggunakan  $D(s) = V(s) - M(s)$ . Jika “*detail*”  $D(s)$  memenuhi criteria penghentian untuk IMF *multivariate*, terapkan prosedur di atas untuk  $V(s) - D(s)$ , jika tidak, terapkan ke  $D(s)$ .

Kriteria penghentian untuk IMF *multivariate* mirip dengan yang diusulkan oleh Huang dkk (2013), perbedaannya adalah bahwa kondisi kesetaraan jumlah ekstrim dan *zero crossing* tidak dikenakan, karena ekstrim tidak dapat secara tepat didefinisikan untuk sinyal *multivariate*.

Transformasi Hilbert (Huang dkk, 1998) dilakukan untuk setiap IMF untuk mendapatkan frekuensi sesaat, yaitu turunan dari fungsi fase. Frekuensi sesaat SW dan faktor lingkungan diubah menjadi periode ( $1/\text{frequency}$ ) dan periode selanjutnya dikonversi ke skala spasial setelah dikalikan dengan *interval sampling*.

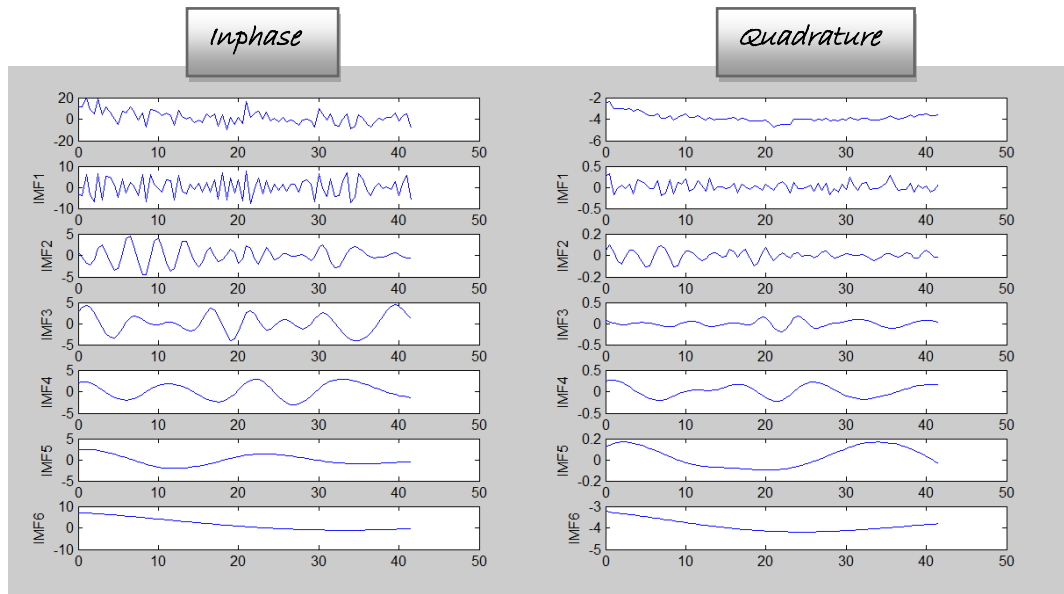
### 2.3. Noise-assisted Multivariate Empirical Mode Decomposition (NA-MEMD)

Algoritma NA-MEMD mencoba untuk mengeliminasi interferensi *noise* yang terjadi pada EEMD dan mereduksi *mode-mixing* pada keluaran EMD dan MEMD. Hal ini diuraikan dalam Algoritma 2, di mana langkah pertama memastikan bahwa saluran *noise* tidak ditambahkan ke sinyal yang sudah memenuhi kriteria IMF. Metode ini beroperasi dengan membentuk sinyal *multivariate* yang terdiri dari *input* data dan *noise* pada *channel* yang terpisah (Rehman dan Mandic, 2011).

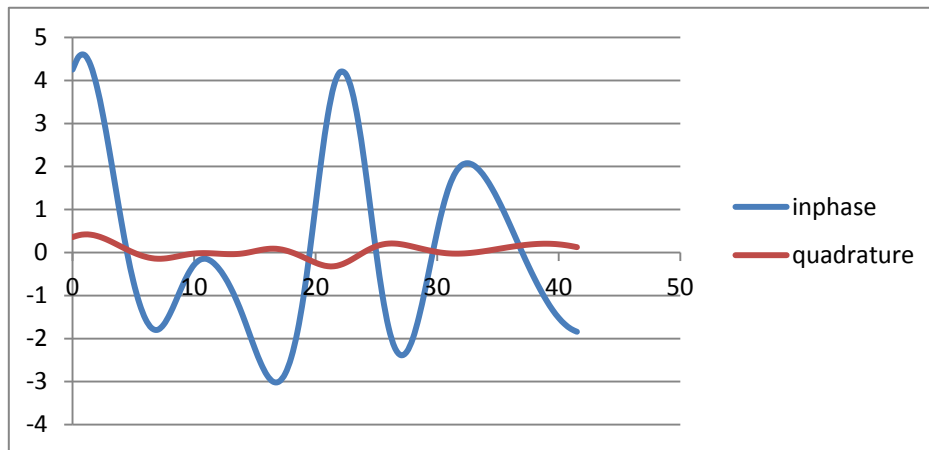
#### Algoritma 2: Noise-Assisted MEMD

1. Periksa apakah sinyal *input* memenuhi kriteria IMF. Jika tidak, lanjutkan ke langkah selanjutnya. Sebaliknya, hentikan proses.
2. Buat *gaussian white noise time series* tak berkorelasi (*l-channel*) yang panjangnya sama dengan panjang *input*, dengan  $l \geq 1$ .
3. Tambahkan saluran *noise* (*l-channel*) yang dibuat di langkah 2 ke sinyal masukan *multivariate* (*n-channel*)  $n \geq 1$ , sehingga diperoleh ( $n+l$ )-*channel* sinyal *multivariate*.
4. Proses sinyal *multivariate* ( $n+l$ )-*channel* yang dihasilkan  $n+l \geq 2$  menggunakan algoritma MEMD untuk mendapatkan IMF *multivariate*.
5. Dari ( $n+l$ ) IMF *multivariate* yang dihasilkan, buang *l-channel* yang bersesuaian dengan *noise*, sehingga memberikan satu set *n-channel* IMF yang sesuai dengan sinyal asli.

Berikut ini adalah contoh hasil pengolahan data lapangan menggunakan NA-MEMD. Pada Gambar 2.6. menampilkan penguraian sinyal berfrekuensi tinggi hingga rendah (IMF1 sampai IMF6) dari data *inphase* dan *quadrature*. Grafik pada IMF6 merupakan residual dan harus dibuang. Selanjutnya, IMF4 dan IMF5 dijumlahkan, hasilnya seperti pada Gambar 2.7.



Gambar 2.6. Hasil penguraian sinyal oleh NA-MEMD



Gambar 2.7. Hasil penjumlahan IMF4 dan IMF5 dari Gambar 2.6.

#### 2.4. Filter Fraser dan Karous-Hjelt

Filter Fraser adalah perangkat lunak yang berfungsi menyaring data di topografi. Filter Fraser diaplikasikan pada data *tilt angle* yang merupakan hasil polarisasi elipstik medan magnetik bawah permukaan. Filter ini, dihitung dengan menggunakan prinsip gradien horizontal dan penghalusan data untuk memberikan nilai maksimum pada benda yang lebih konduktif. Konsekuensinya, penggambaran Filter Fraser diberikan oleh fungsi.

$$F_n = (M_{n+2} + M_{n+3}) - (M_n + M_{n+1}) \quad (2.20)$$

Penggunaan Filter Fraser dapat digunakan untuk melokalisir bahan yang lebih konduktif. Anomali yang dihasilkan dari Filter Fraser nampak lebih fokus dan tajam. Hasil ini, secara geologi dapat menunjukkan letak anomali yang konduktif dan resesif dengan lebih tepat jika dibandingkan dengan data lapangan yang tidak dilakukan filter Fraser.

Filter Karous-Hjelt merupakan penyempurnaan dari Filter Fraser. Filter Karous-Hjelt (Karous dan Hjelt, 1983) merupakan filter yang dikembangkan dari konsep medan magnetik yang berhubungan dengan aliran arus listrik. Filter ini dikembangkan dari filter statistika linear berdasarkan atas Filter Fraser (Fraser, 1969) dan teori filter linear dari Bendat dan Piersol (1968). Filter ini menghasilkan profil variasi rapat arus terhadap kedalaman yang diturunkan dari nilai komponen vertikal medan magnetik pada setiap titik pengukuran.

Eksperimen telah dilakukan dengan sejumlah koefisien filter (Karous dan Hjelt, 1977). Hasilnya menunjukkan bahwa filter bekerja dengan baik. Bentuk sederhananya adalah sebagai berikut:

$$\frac{\Delta z}{2\pi} I_a \left( \frac{\Delta x}{2} \right) = -0.205H_{-2} + 0.323H_{-1} - 1.446H_0 + 1.446H_1 - 0.323H_2 + 0.205H_3 \quad (2.21)$$

dimana

$$H_i = H_{zm}(i. \Delta x) \quad (2.22)$$

Dalam interpretasi data lapangan, nilai yang terukur harus diperhalus sebelum difilter. Dengan mengambil rata-rata dari nilai yang berdekatan  $H_i$  dan  $I_a$ , filter yang simetris kita dapatkan:

$$\frac{\Delta z}{2\pi} \bar{I}_a(0) = -0.102H_{-2} + 0.059H_{-1} - 0.561H_0 + 0.561H_1 - 0.059H_2 + 0.102H_3 \quad (2.23)$$

dimana

$$\bar{I}(0) = \frac{1}{2} \left[ I \left( \frac{\Delta x}{2} \right) + I \left( -\frac{\Delta x}{2} \right) \right] \quad (2.24)$$

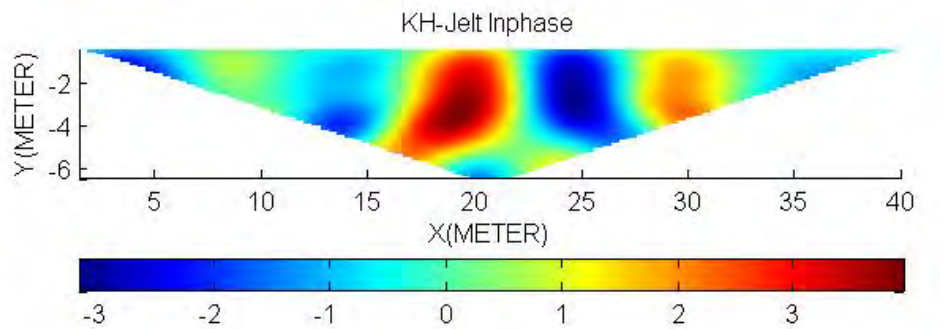
Koefisien filter (Tabel 2.2) diterapkan secara terpisah pada komponen *inphase* (riil) dan *quadrature* (imajiner) dari anomali relatif  $H_{zm}/H_0$  untuk memberikan komponen yang sesuai dari rapat arus. Contoh hasil penerapan filter Karous-Hjelt dapat dilihat pada Gambar 2.8.

Tabel 2.2. Koefisien filter  $K_{i0}^{-1}$  untuk beberapa nilai  $n$ . Koefisien untuk  $-i + 1$  adalah  $-1$  kali koefisien untuk  $i$

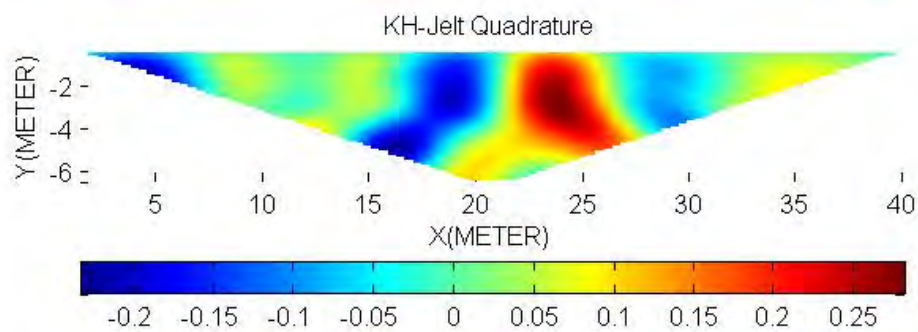
$i$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$n$										
0	1.250									
1	1.383	-0.115								
2	1.446	-0.323	0.205							
3	1.434	-0.299	-0.109	0.102						
4	1.434	-0.298	0.116	-0.003	0.116					
9	1.434	-0.299	0.109	0.013	0.027	0.020	0.019	0.022	0.022	0.081

Sumber: Karous dan Hjelt (1983)

Berikut adalah contoh hasil pengolahan menggunakan Filter Karous-Hjelt:



(a)



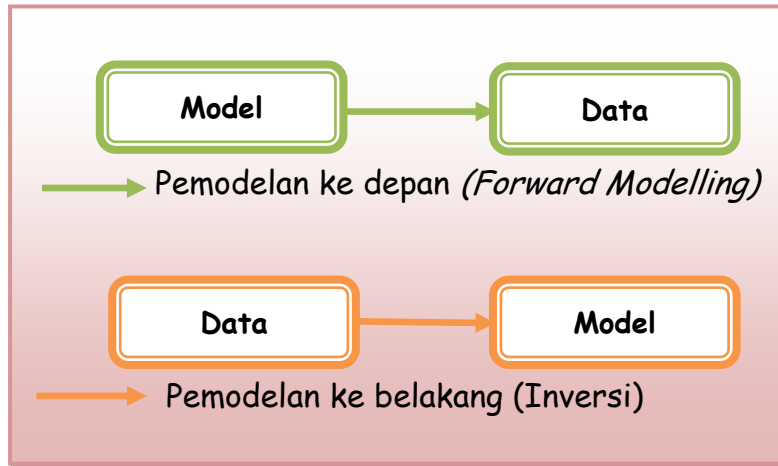
(b)

Gambar 2.8. Hasil pengolahan menggunakan Filter Karous Hjelt  
(a) Data *Inphase* (b) Data *Quadrature*



## 2.5. *Forward Modelling* dan Inversi

*Forward modelling* merupakan pemodelan yang dilakukan untuk memperoleh data dari model yang ada berdasarkan sifat-sifat fisis yang diketahui. Sedangkan inversi merupakan suatu penjabaran matematis untuk memperoleh informasi sistem fisika berdasarkan data observasi terhadap suatu sistem tersebut (Menke, 1984).



Gambar 2.9. Perbandingan *forward modelling* dan inversi

Untuk dapat memodelkan parameter fisis lapisan bumi terhadap nilai resistivitas semu dan nilai fase TE, terlebih dahulu dilakukan diskritisasi parameter fisis blok lapisan bumi tersebut. Parameter fisis yang berkaitan dengan resistivitas semu dan fase TE adalah nilai resistivitas batuan. Misalkan  $m$  merupakan diskritisasi resistivitas suatu batuan, maka  $m = [m_1, m_2, m_3, \dots, m_n]$  dan  $d$  adalah data observasi  $d = [d_1, d_2, d_3, \dots, d_n]$  serta parameter model secara teori  $F[m]$ . Hubungan data dengan parameter model secara umum dapat dinyatakan oleh persamaan:

$$d = F[m] \quad (2.25)$$

Persamaan (2.25) digunakan untuk menyatakan hubungan antara data dengan parameter model yang direpresentasikan oleh fungsi nonlinear. Dalam hal ini  $F[m]$  sebagai fungsi pemodelan ke depan yang merupakan fungsi nonlinear dari parameter model.

Dengan data pengukuran  $d$ , maka cara konvensional untuk dapat memecahkan permasalahan inversi pada persamaan (2.25) didasarkan pada minimalisasi fungsi parametric Tikhonov yang direpresentasikan oleh persamaan:

$$P(m) = \phi(m) + \lambda^2 s(m) \quad (2.26)$$

$\phi(m)$  merupakan fungsi *misfit*,  $s(m)$  sebagai fungsi penstabil,  $\lambda$  parameter regulasi yang mengontrol *trade-off* antara dua parameter yang berkontribusi terhadap model. Fungsi misfit dan penstabil dituliskan oleh:

$$\phi(m) = \|d - A(m)\| \quad (2.27)$$

$$s(m) = \|C(m)\|^2 \quad (2.28)$$

$C$  merupakan matrik pembobot pada parameter model (Zhdanov, 2002). Rodi dan Mackie (2001) menggunakan metode Gauss-Newton (GN) untuk inversi data medan elektromagnetik. Dasar metode ini, melinearkan  $F[m]$  dengan menggunakan deret Taylor dengan mengambil dua suku pertama.

$$F[m_{k+1}] - F[m_k + \delta_m] = F[m_k] + J_k(m_{k+1} - m_k) \quad (2.29)$$

$k$  merupakan bilangan iterasi, dan  $J = \partial F / \partial m$  adalah matriks sensitivitas atau biasa disebut dengan matrik Jacobian. Selanjutnya, persamaan ini dapat dijadikan menjadi persamaan linear.

$$F[m_{k+1}] - F[m_k] = J_k (m_{k+1} - m_k) \quad (2.30)$$

Persamaan ini mirip dengan persamaan yang berlaku hubungan linear antara data dan parameter model,  $d = Fm$ . Pada kasus ini maka data diganti dengan perturbasi  $F[m_{k+1}] - F[m_k]$  data dan model diganti dengan perturbasi model ( $m_{k+1} - m_k$ ). Selain itu matriks Kernel pada kasus ini merupakan matriks Jacobian yang mengandung arti seberapa besar data prediksi berubah sebagai akibat perubahan atau perturbasi model. Karena itulah, matriks Jacobian disebut matriks sensitivitas. Berdasarkan analogi, solusi inversi persamaan ini dapat dinyatakan (De Groot-Hedlin dan Constable, 1990).

$$m_{k+1} = m_k + [J_k^T J_k]^{-1} J_k^T (F[m_{k+1}] - F[m_k]) \quad (2.31)$$

Persamaan ini menyatakan bahwa model iterasi ke- $(k+1)$  merupakan model iterasi sebelumnya  $k$  yang *diupdate* dengan menggunakan suatu faktor koreksi.

Menurut Grandis (2009), persamaan ini seringkali terjadi *overshoot* di awal iterasi. Oleh karena itu Levenberg-Marquadt memodifikasi persamaan tersebut dengan menggunakan *Lagrange Multiplier* ( $\lambda$ ) dan operator penghalus Laplacian (C). Operator Laplacian diestimasi dari differensial kedua dengan menggunakan metode *Finite Difference*. Operator ini diungkapkan pada persamaan:

$$C = \begin{bmatrix} 1 & -2 & 1 & 1 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & -2 & 1 & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 1 & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & \dots & 1 & -2 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.32)$$

$$m_{k+1} = m_k + [J_k^T J_k + \lambda^2 C^T C]^{-1} J_k^T (F[m_{k+1}] - F[m_k]) \quad (2.33)$$

Metode ini merupakan gabungan metode GN dengan metode Gradien yang disebut sebagai metode Levenberg-Marquadt yang identik dengan inversi nonlinear teredam (Grandis,2009). Secara garis besar tahapan metode ini yaitu, proses iterasi awal digunakan faktor redaman  $\lambda^2$  yang cukup besar sehingga elemen diagonalnya menjadi dominan, berlaku metode Gradien. Jika perturbasi model menghasilkan fungsi obyektif yang lebih rendah berarti mendekati solusi dan pengaruh  $\lambda^2$  diperkecil, sehingga langkah berikutnya menggunakan metode GN.

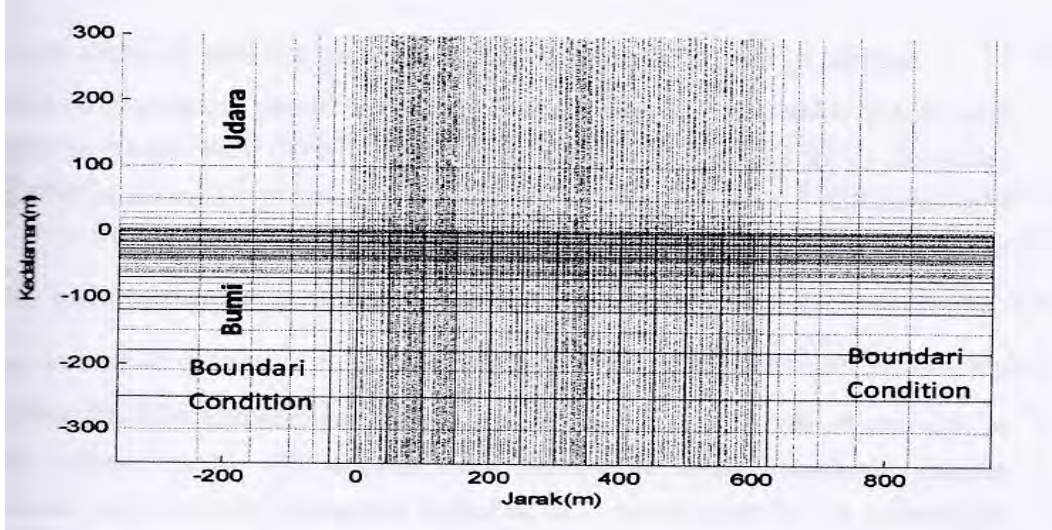
## 2.6. Finite Element Method (FEM)

Pada dasarnya metode ini digunakan untuk menyederhanakan suatu permasalahan secara numerik dengan hasil yang mendekati hasil analitik (Kwon dan Bang, 1996). *Finite Element Method Galerkin* digunakan untuk menyelesaikan persamaan:

$$K\{E_x\} = s \quad (2.34)$$

$K$  merupakan matriks jarang yang berukuran  $N \times N$  yang mengandung variable posisi dan resistivitas batuan dan  $s$  adalah *boundary condition* dengan

ukuran  $N \times 1$  dengan  $N$  adalah banyaknya nilai  $E_x$  yang ingin diketahui. Metode ini dilakukan dengan jalan membuat *grid* terlebih dahulu seperti pada gambar berikut:



Gambar 2.10. *Grid* untuk analisis  $E_x$  dengan menggunakan metode FEM

Estimasi nilai  $E_x$  sering menimbulkan masalah. Hal ini terjadi karena matriks  $K$  seringkali bersifat *singular*. Untuk itu estimasi  $E_x$  dapat dilakukan dengan metode *Quasi-minimal residual* (QMR), dekomposisi LU atau metode *Biconjugate-Gradient*.

Selanjutnya dilakukan analisis interpolasi untuk mengetahui  $E_x$  yang belum diketahui (Srigutomo et al., 2005). Syarat batas pada permukaan bumi atau bagian atas model dengan pengaturan nilai medan listrik dengan nilai 1, sedangkan syarat batas bagian samping berdasarkan  $\partial E_x / \partial y = 0$ . Batas bagian bawah didasarkan pada persamaan *skin depth*. Selanjutnya  $E_x$  dapat diestimasi berdasarkan persamaan (2.34).

Selanjutnya untuk estimasi  $H_z$  dan  $H_y$  dilakukan dengan menggunakan metode FEM.  $H_z$  dinyatakan melalui  $a_k$  dan  $E_x$  menurut persamaan dan  $H_y$  dinyatakan melalui  $b_k$  dan  $E_x$  menurut persamaan. Sehingga didapatkan persamaan:

$$a_k^T E_x = H_z^k \quad (2.35)$$

$$b_k^T E_x = H_y^k \quad (2.36)$$

Matriks  $a_k^T$  dan  $b_k^T$  berukuran  $N \times N$ . Estimasi  $H_z$  dan  $H_y$  pada persamaan (2.35) dan (2.36) dilakukan dengan perkalian matriks biasa. Selanjutnya estimasi matriks Jacobian yang efisien diusulkan oleh Rodi dan Mackie (2001). Impedansi ke-k atau datum VLF untuk suatu model  $m$  dinyatakan sebagai komponen horizontal elektrik atau magnetik dari TE

$$Z^k(m) = \frac{a_k(m)^T E_x(m)}{b_k(m)^T E_x(m)} \quad (2.37)$$

$a_k(m)$  dan  $b_k(m)$  adalah vektor-vektor koefisien perhitungan differensiasi sentral dari medan pembantu pada impedansi jenis medan TE. Input matriks Jacobian untuk impedansi ke-k atau datum TE terhadap parameter model ke-1 kemudian dihitung sebagai:

$$\begin{aligned} J^{kl}(m) &= \frac{\partial Z^k(m)}{\partial m^l} = \frac{1}{b_k^T E_x} \frac{\partial(a_k^T)}{\partial m^l} - \frac{a_k^T E_x}{(b_k^T E_x)^2} \frac{\partial(b_k^T E_x)}{\partial m^l} \\ &= \left( \frac{1}{b_k^T E_x} \frac{\partial a_k}{\partial m^l} - \frac{a_k^T E_x}{(b_k^T E_x)^2} \frac{\partial b_k}{\partial m^l} \right)^T + \left( \frac{1}{b_k^T E_x} a_k - \frac{a_k^T E_x}{(b_k^T E_x)^2} b_k \right)^T \frac{\partial E_x}{\partial m^l} \end{aligned} \quad (2.38)$$

Dengan definisi

$$c_k = \frac{1}{b_k^T E_x} a_k - \frac{a_k^T E_x}{(b_k^T E_x)^2} b_k \quad (2.39)$$

$$d^{kl} = \frac{1}{b_k^T E_x} \frac{\partial a_k}{\partial m^l} - \frac{a_k^T E_x}{(b_k^T E_x)^2} \frac{\partial b_k}{\partial m^l} \quad (2.40)$$

Dengan menurunkan persamaan (2.40) terhadap  $m$ , maka dihasilkan persamaan berikut:

$$K \frac{\partial X}{\partial m^l} = -\frac{\partial K}{\partial m^l} E_x + \frac{\partial s}{\partial m^l} \quad (2.41)$$

Persamaan (2.41) disubstitusikan ke dalam persamaan (2.38) menghasilkan matriks Jacobian seperti persamaan berikut ini:

$$J(m) = d_{kl}^T E_x + C_k^T K^{-1} \left( -\frac{\partial K}{\partial m^l} E_x + \frac{\partial s}{\partial m^l} \right)$$

$$= d_{kl}^T E_x + u_k^T \left( -\frac{\partial K}{\partial m^l} E_x + \frac{\partial s}{\partial m^l} \right) \quad (2.42)$$

Perhitungan  $u_k$  sebagai solusi permasalahan *forward modelling*  $K^T u_k = c_k$  memanfaatkan sifat timbal balik dari permasalahan ke depan (simetrisitas matriks sistem  $K$  dan inversinya). Perhitungan  $u_k$  untuk  $k = 1, 2, 3, \dots, N$  secara signifikan lebih cepat daripada perhitungan  $K^{-1} \left( -\frac{\partial K}{\partial m^l} E_x + \frac{\partial s}{\partial m^l} \right)$  untuk  $l = 1, 2, 3, \dots, M$  dalam kasus 2-D yang termasuk dalam kasus under determined (jumlah parameter model lebih banyak daripada jumlah data atau  $M > N$ ).

## 2.7. Sifat Elektromagnetik Material Arkeologi

Keberhasilan eksplorasi situs-situs purbakala yang terpendam di bawah permukaan dengan menggunakan metode geofisika sangat bergantung pada pengetahuan sifat-sifat fisika atas target yang dicari. Pada metode VLF sifat-sifat magnetik dan listrik material merupakan sifat utama yang dapat mengindikasikan keberadaan target yang dicari. Kebanyakan situs purbakala yang dicari terpendam kurang dari 1 meter di bawah permukaan. Material yang menutupi di atas target umumnya berupa *alluvium*, *colluviums*, *peat*, pasir, tanah, atau lumpur. Kondisi demikian memberikan tantangan tersendiri dalam eksplorasi yang menggunakan konsep elektromagnetik. Metode elektromagnetik VLF berkerja berdasarkan adanya variasi resistivitas atau konduktivitas material di bawah permukaan.

Resistivitas batuan di bawah permukaan bumi sangat bergantung pada kandungan air dan salinitas air di dalamnya. Air asin memiliki sifat konduktivitas yang lebih tinggi daripada air tawar. Sementara itu, kandungan air di dalam batuan juga dapat meningkatkan konduktivitas batuan tersebut (Telford, et.al., 1990). Sisa-sisa kanal purba yang terisi tanah atau *silt* umumnya bersifat basah, sehingga memiliki sifat resistivitas yang relatif rendah. Sedangkan material berupa kerikil dan kerakal yang terpendam di bawah permukaan bahkan dapat menyimpan air yang lebih banyak jika dibatasi oleh lapisan yang kedap di bawahnya. Kondisi semacam ini dapat meningkatkan nilai konduktivitas lapisan tersebut dibandingkan dengan material lain yang ada di sekitarnya. Sedangkan formasi berupa tembok umumnya kering dengan nilai resistivitas yang relatif

tinggi. Ini merupakan target utama dalam pencarian sisa-sisa arca di sekitar Candi Gambar Wetan karena candi atau arca yang telah ditemukan sebelumnya terbuat dari batuan.

Halaman ini sengaja dikosongkan



## BAB 3

### METODOLOGI PENELITIAN

#### 3.1. Kondisi Geologi dan Lokasi Penelitian

Kabupaten Blitar merupakan salah satu daerah di Jawa Timur yang secara geografis terletak pada  $111^{\circ}40'-112^{\circ}10'$  BT dan  $7^{\circ}58'-8^{\circ}9'51'$  LS. Lokasi Kabupaten Blitar berada di sebelah selatan khatulistiwa. Kabupaten Blitar berbatasan dengan tiga kabupaten lain, yaitu sebelah timur berbatasan dengan Kabupaten Malang, sebelah barat berbatasan dengan Kabupaten Tulungagung dan Kabupaten Kediri sedangkan sebelah utara berbatasan dengan Kabupaten Kediri dan Kabupaten Malang. Sementara itu, sebelah selatan adalah Samudera Indonesia. Penelitian yang dilakukan bertempat di Dusun Gambar Anyar, Desa Sumberasri, Kecamatan Nglegok, Kabupaten Blitar. Daerah Nglegok merupakan daerah perbatasan Blitar-Kediri. Daerah ini termasuk lereng Gunung Kelud. Berikut ini adalah peta lokasi penelitian:



Gambar 3.1. Peta Kabupaten Blitar



Gambar 3.2. Rute Candi Gambar Wetan

Kabupaten Blitar mempunyai ketinggian  $\pm 167$  meter. Blitar terletak di kaki lereng Gunung Kelud. Secara geologis, tanah daerah Blitar berupa tanah vulkanik yang mengandung abu ledakan gunung berapi, pasir dan napal (batu kapur bercampuran tanah liat). Warnanya kelabu kekuning-kuningan. Sifatnya masam, gembur dan peka terhadap erosi. Rata-rata curah hujan tahunan di Kabupaten Blitar adalah 1.478,8 mm dengan curah hujan tertinggi 2.618,2 mm per tahun dan terendah 1.024,7 mm per tahun. Sedangkan suhu tertinggi  $30^{\circ}\text{C}$  dan suhu terendah  $18^{\circ}\text{C}$ . Letak topografi tinggi tempat tertinggi adalah 800 meter (dpa) dan tinggi tempat terendah adalah 40 meter (dpa).

Kondisi arca-arca maupun bangunan Candi Gambar Wetan yang sudah ditemukan maupun yang masih terpendam dalam tanah dan hanya beberapa bagian saja yang telah muncul dapat dilihat pada Gambar (3.3).



(a)



(b)



(c)



(d)

Gambar 3.3. Bangunan dan arca Candi Gambar Wetan

- (a) Arca candi yang pertama kali ditemukan tahun 1983
- (b) Bangunan tempat pemujaan
- (c) Penemuan arca terbaru bulan Mei 2014
- (d) Batuan candi yang masih terlihat sebagian, sedangkan bagian lainnya masih terpendam dalam tanah

### 3.2. Perangkat Penelitian

#### 3.2.1. Peralatan

Peralatan yang diperlukan pada akuisi data lapangan, antara lain sebagai berikut:

- a. Alat VLF: *Envi Scintrex*, digunakan untuk merekam data VLF-EM, yaitu *inphase*, *quadrature*, *t-field* dan *tilt*.
- b. Kompas, digunakan untuk menunjukkan arah.
- c. Roll meter, digunakan untuk mengukur jarak antar titik pengukuran.
- d. *Global Positioning System* (GPS), digunakan untuk menentukan koordinat dari lokasi penelitian.
- e. Kamera digital, digunakan untuk memotret kondisi area sekitar Candi Gambar Wetan.
- f. Alat tulis, digunakan untuk mencatat hasil keluaran yang terekam oleh alat VLF-EM.



(a) *Envi Scintrex*



(b) Kompas Geologi



(c) GPS

Gambar 3.4. Peralatan Akusisi Data

### 3.2.2. Perangkat Lunak

Perangkat lunak (*software*) yang digunakan dalam proses pengolahan dan interpretasi data sebagai berikut:

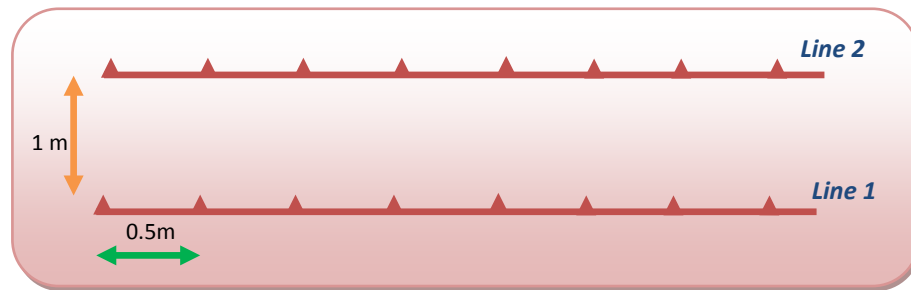
- Microsoft Excel*, digunakan sebagai *input* data awal, data lapangan yang sudah diperoleh dan dicatat ditulis kembali ke dalam *excel*.
- Matlab, digunakan untuk memroses Filter NA-MEMD dari data masukan dan menuliskan hasil *processing* ke dalam *excel*, serta melakukan interpretasi letak anomali yang lebih konduktif dan resesif (Filter Karous-Hjelt).
- Inv2DVLf-v1*, digunakan untuk melakukan estimasi nilai resistivitas semu dua dimensi (inversi) berdasarkan data *tipper* (*inphase* dan *quadrature*).
- Surfer 9*, digunakan untuk melakukan interpretasi dengan mengkonstruksi nilai resistivitas semu 2D dari hasil keluaran *Inv2DVLf-v1*.

### 3.3. Akusisi Data

Akuisisi data dilakukan di area sekitar Candi Gambar Wetan dan dibagi menjadi beberapa lintasan. Teknik akuisisi data setiap lintasan dilakukan dengan teknik pengambilan atau akuisisi data secara teknik konvensional (berdiri) dengan operator menghadap ke pemancar. Masing-masing lintasan memiliki bentangan pengukuran sepanjang  $\pm 100$  m. Lintasan-lintasan tersebut dibuat sejajar dengan jarak antarlintasan adalah 1m, sedangkan jarak antartitik pengukuran (spasi) sebesar 0.5m (Gambar 3.5). Penentuan besar spasi antarlintasan dan spasi antartitik tersebut berdasarkan pertimbangan bahwa diperkirakan



sedimen batuan yang masih terpendam dalam tanah bisa berukuran kecil dengan panjang 0.5m karena arca-arca yang sudah ditemukan ada yang berukuran kecil dengan panjang 0.5 sampai 1m. Pada setiap titik pengukuran, alat VLF dihidupkan dan data yang terekam oleh *Envi Scintrex* dicatat. Data yang diperoleh dari hasil pengukuran VLF-EM, antara lain: *inphase*, *quadrature*, *t-field* dan *tilt*.



Gambar 3.5. Spasi antarlintasan dan antartitik pengukuran



(a)



(b)



(c)



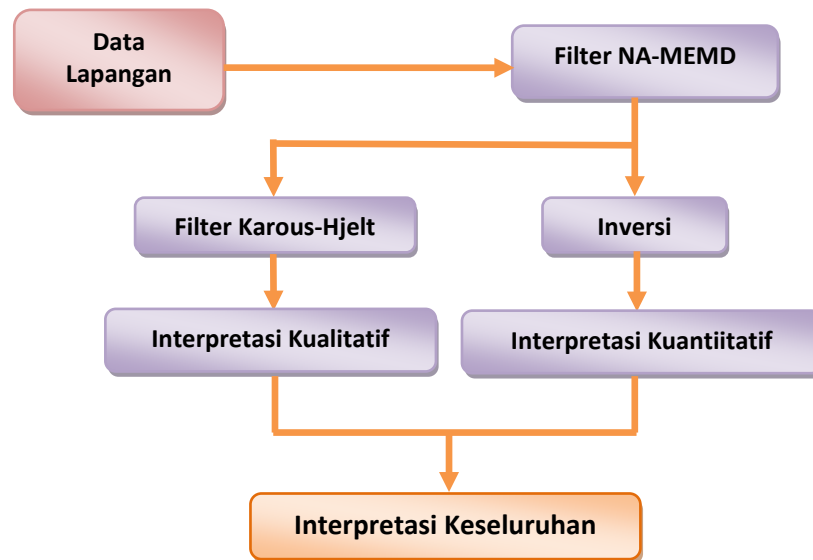
(d)

Gambar 3.6. Lintasan yang dipilih saat akusisi data

- (a) Area pertama, melintasi bagian batuan yang terlihat sebagian di permukaan
- (b) Alur akusisi data pada area pertama untuk *line 1* sampai *line 4*
- (c) Area kedua, melintasi bangunan tempat pemujaan
- (d) Alur akusisi data pada area kedua untuk *line 5* sampai *line 9*

### 3.4. Pengolahan, Interpretasi dan Analisa Data

Data yang diperoleh dari hasil pengukuran VLF-EM ditulis kembali ke dalam bentuk *excel*. Data *inphase* dan *quadrature* kemudian dimasukkan ke dalam matlab untuk dilakukan proses filter NA-MEMD. Data hasil *filtering* NA-MEMD kemudian diinterpretasikan secara kualitatif dan kuantitatif. Interpretasi kualitatif dilakukan dengan menggunakan Filter Karous-Hjelt sehingga dihasilkan profil letak anomali yang lebih konduktif dan resesif. Interpretasi kuantitatif dilakukan dengan menggunakan software *Inv2D VLF-v1* untuk mendapatkan profil resistivitas semu 2D. Keseluruhan langkah-langkah dalam proses pengolahan, interpretasi, dan analisa data dapat dilihat dalam diagram alir pada Gambar (3.7).



Gambar 3.7. Diagram alir pengolahan, analisa, dan interpretasi data

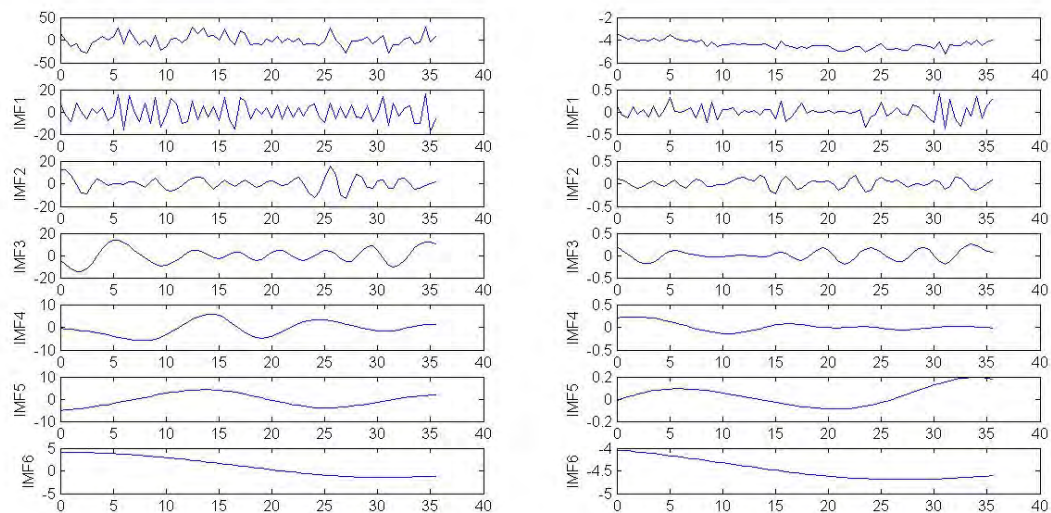
## BAB 4

### ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN

#### 4.1 Hasil Filtering NA-MEMD

Data yang telah diperoleh dari lapangan diolah terlebih dahulu menggunakan *filtering* NA-MEMD untuk mengeliminasi *noise* berfrekuensi tinggi. Hasil *filtering* NA-MEMD sebagai berikut:

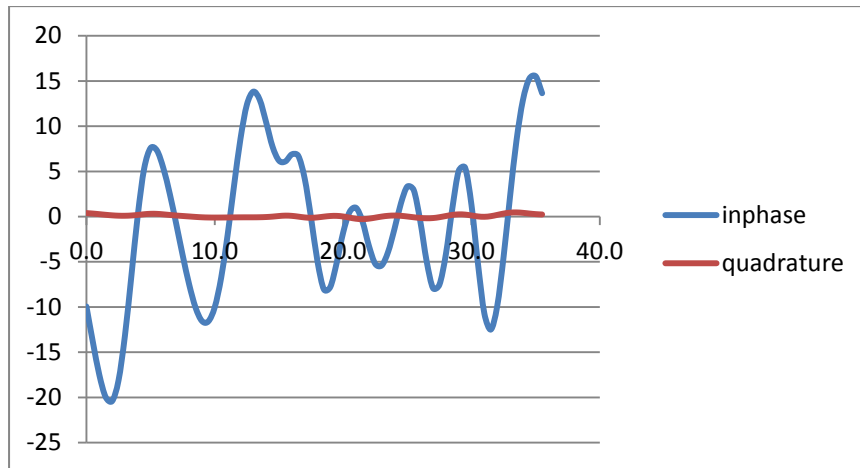
➤ **Line 1**



Gambar 4.1 Hasil dekomposisi menggunakan NA-MEMD untuk data *inphase* (kiri) dan *quadrature* (kanan) line 1

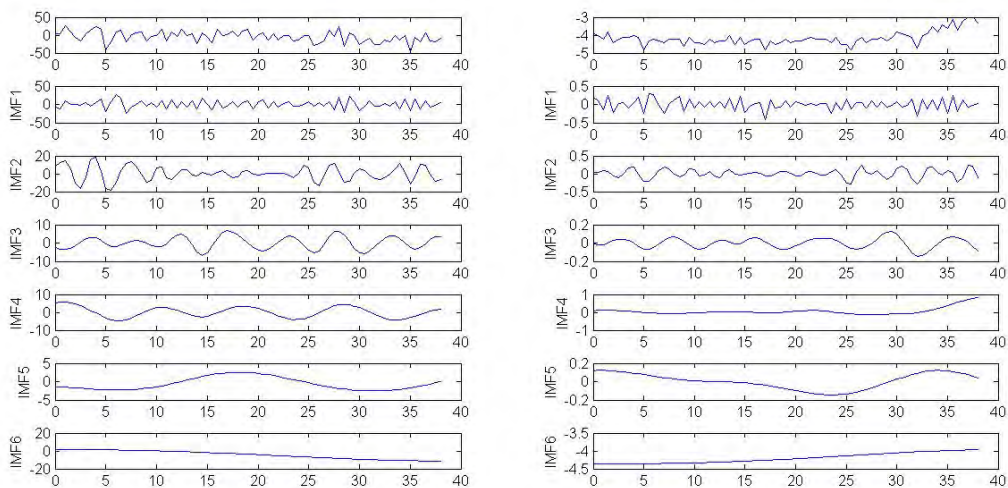
Berdasarkan hasil dekomposisi atau penguraian sinyal dari data lapangan yang telah diperoleh dan menerapkan prinsip seleksi yang diusulkan oleh Jeng (2007), maka pada *inphase* IMF1 dan IMF2 harus dieliminasi karena menunjukkan distribusi yang kaya akan gelombang harmonik transien (frekuensi tinggi). Selain itu, IMF 6 merupakan residu yang harus dieliminasi karena tidak memenuhi *zero-crossings* yang merupakan salah satu kriteria dari sinyal VLF. Sedangkan pada *quadrature* dilakukan eliminasi untuk IMF1, IMF2, IMF3, dan IMF6. Oleh karena itu, sinyal VLF dapat direkonstruksi dari IMF3, IMF4 dan

IMF5 untuk *inphase* serta IMF4 dan IMF5 untuk *quadrature*. Dengan menjumlahkan IMF tersebut, maka diperoleh sinyal seperti pada Gambar 4.2.



Gambar 4.2 Hasil rekonstruksi data lapangan VLF-EM *line 1*

#### ➤ *Line 2*

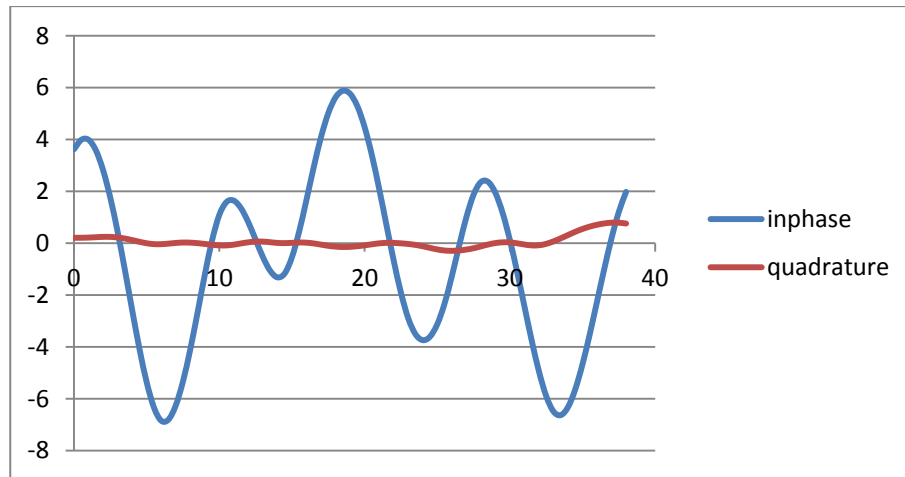


Gambar 4.3 Hasil dekomposisi menggunakan NA-MEMD untuk data *inphase* (kiri) dan *quadrature* (kanan) *line 2*

Dengan menggunakan prinsip yang sama, yaitu berdasarkan hasil penguraian sinyal, selanjutnya dilakukan eliminasi untuk IMF yang bentuk gelombangnya nonstasioner dan eliminasi terhadap IMF residual, maka untuk data *inphase* pada *line 2* ini diambil IMF 4 dan IMF5. Sedangkan untuk *quadrature* diambil IMF 3,

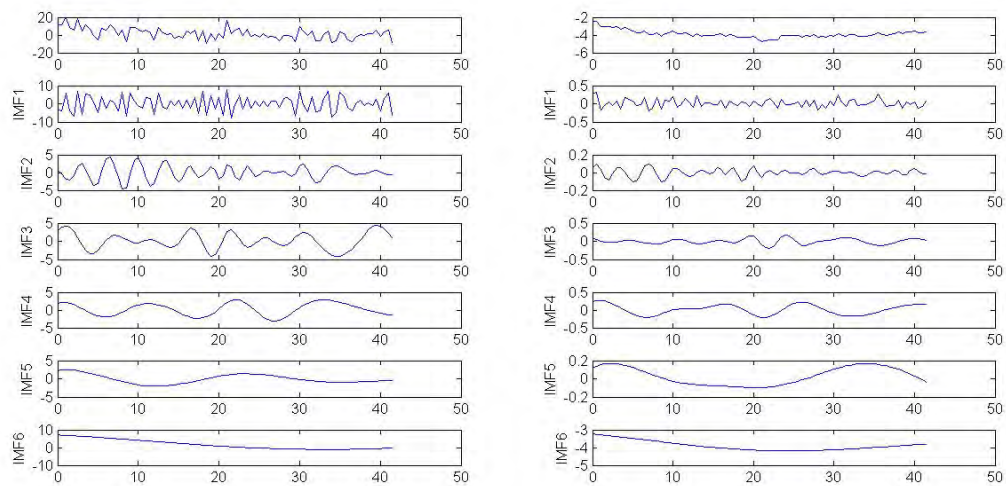


IMF4, dan IMF5. Hasil rekonstruksi dari IMF yang telah dipilih dapat dilihat pada Gambar 4.4.



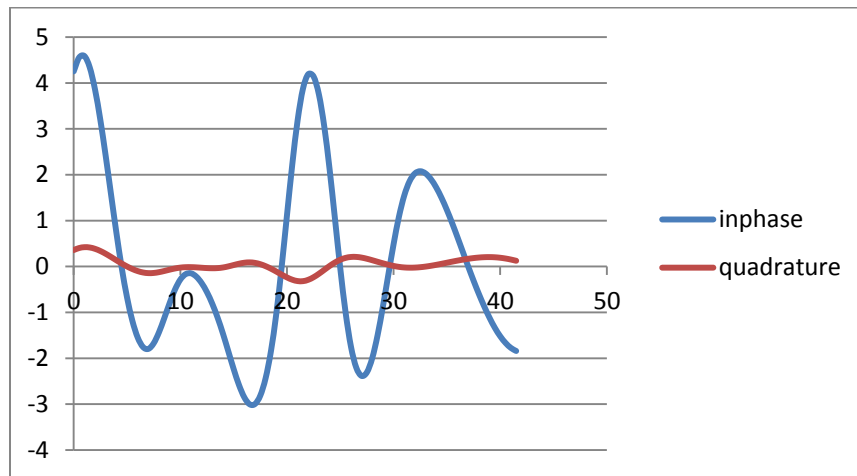
Gambar 4.4 Hasil rekonstruksi data lapangan VLF-EM *line 2*

### ➤ *Line 3*



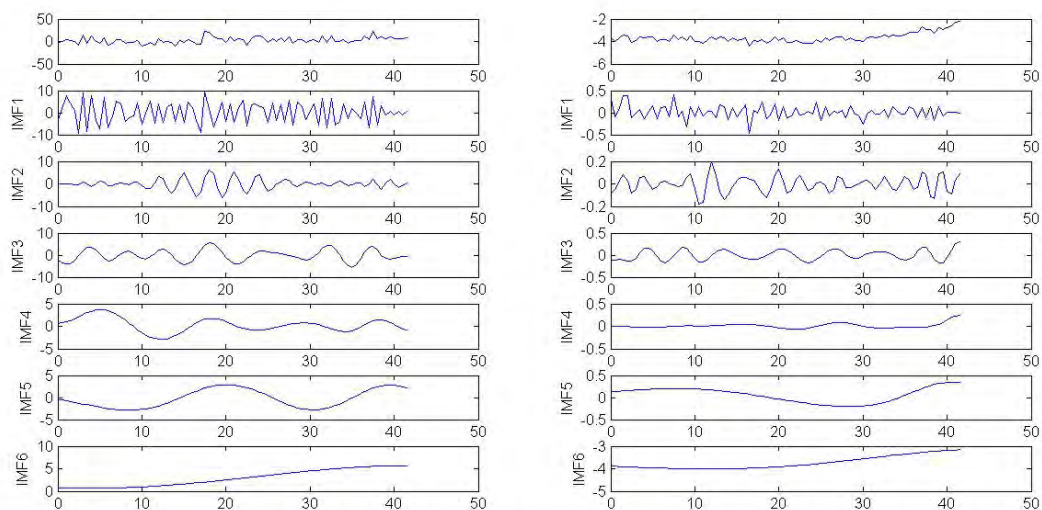
Gambar 4.5 Hasil dekomposisi menggunakan NA-MEMD untuk data *inphase* (kiri) dan *quadrature* (kanan) *line 3*

Pada *line 3* diambil IMF4 dan IMF5, baik untuk *inphase* maupun *quadrature*. Hasil penjumlahan kedua IMF tersebut untuk masing-masing *phase* dapat dilihat pada Gambar 4.6.



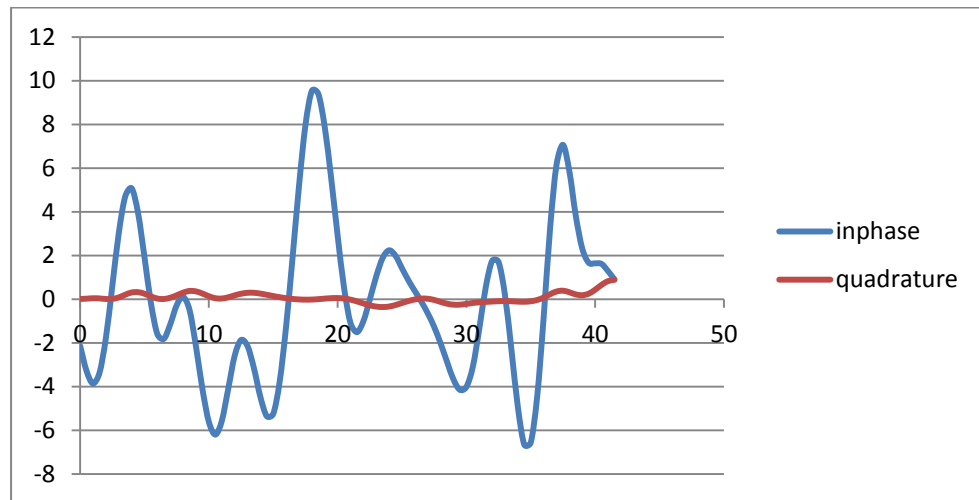
Gambar 4.6 Hasil rekonstruksi data lapangan VLF-EM *line 3*

#### ➤ *Line 4*



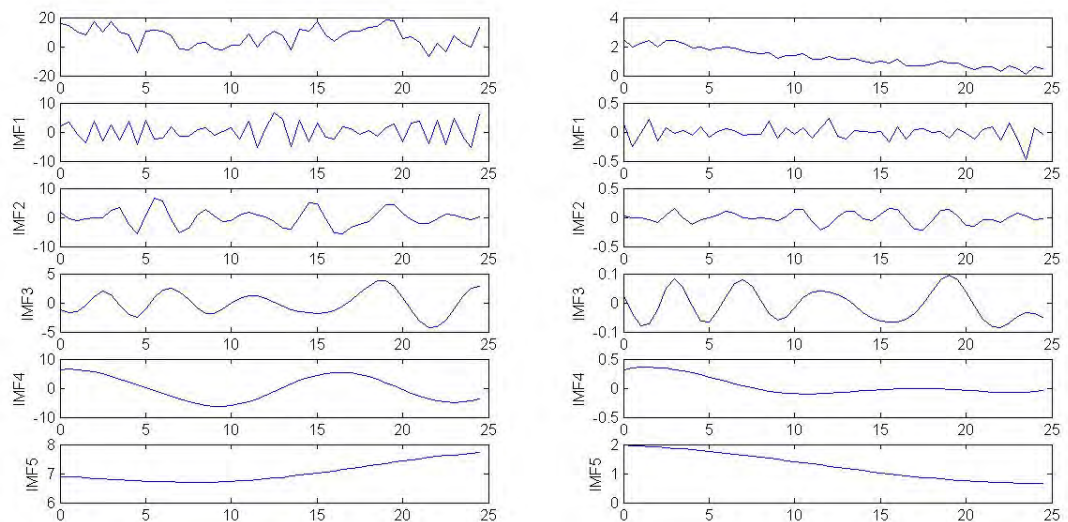
Gambar 4.7 Hasil dekomposisi menggunakan NA-MEMD untuk data *inphase* (kiri) dan *quadrature* (kanan) *line 4*

Pada hasil penguraian sinyal *line 4* diambil IMF3, IMF4, dan IMF5 baik untuk *inphase* maupun *quadrature*. Hasil penjumlahan sinyal dari ketiga IMF tersebut dapat dilihat pada Gambar 4.8.



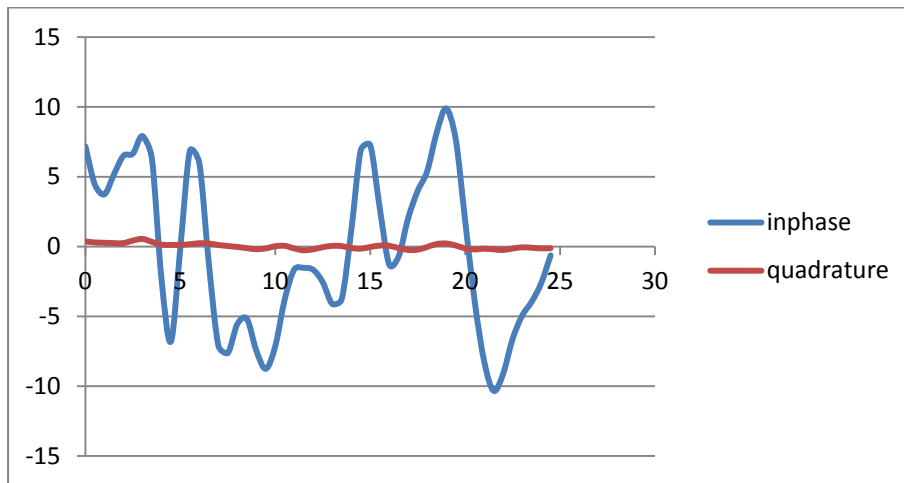
Gambar 4.8 Hasil rekonstruksi data lapangan VLF-EM *line 4*

➤ **Line 5**



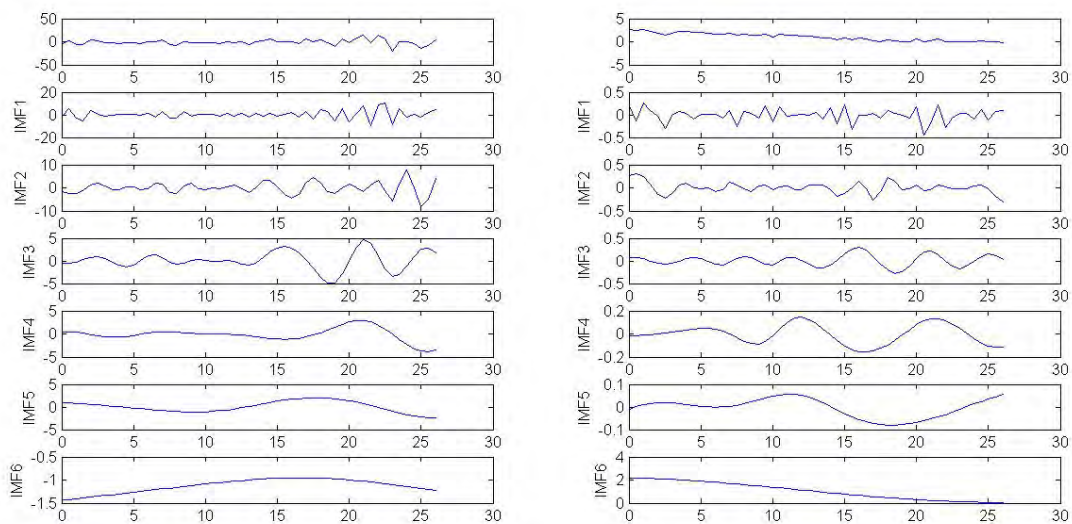
Gambar 4.9 Hasil dekomposisi menggunakan NA-MEMD untuk data *inphase* (kiri) dan *quadrature* (kanan) *line 5*

Mode yang diambil pada *line 5* ini adalah IMF2, IMF3, dan IMF4, baik untuk *inphase* maupun *quadrature*. Penjumlahan ketiga IMF tersebut dapat dilihat pada Gambar 4.10.



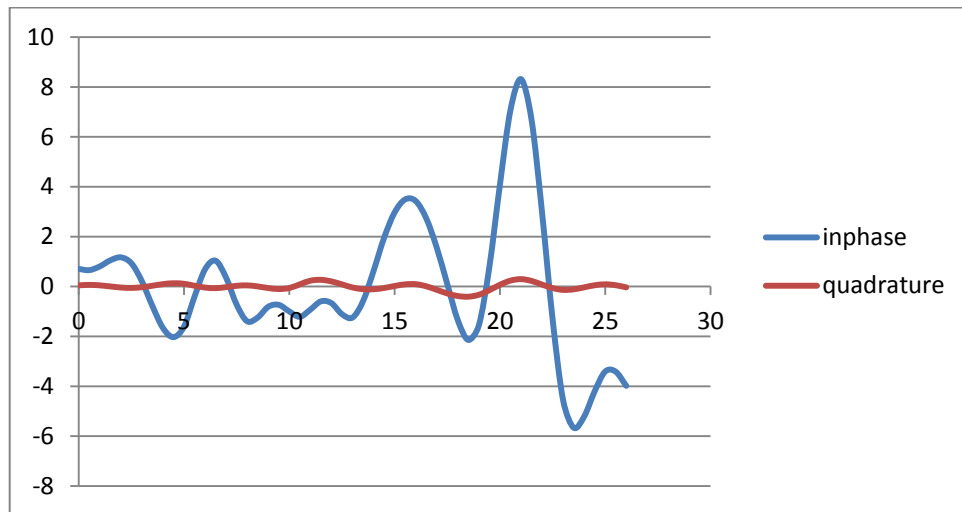
Gambar 4.10 Hasil rekonstruksi data lapangan VLF-EM *line 5*

#### ➤ *Line 6*



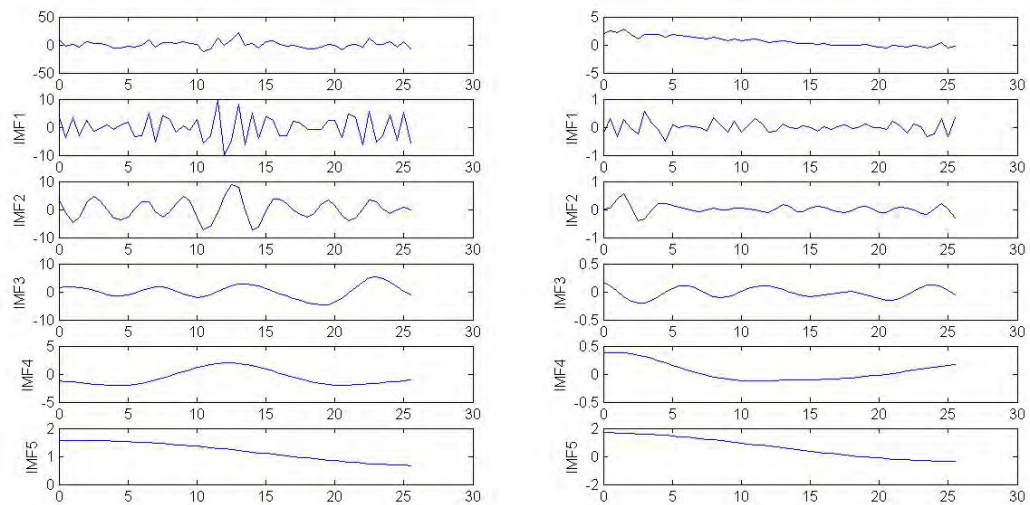
Gambar 4.11 Hasil dekomposisi menggunakan NA-MEMD untuk data *inphase* (kiri) dan *quadrature* (kanan) *line 6*

Pada *line 6* diambil IMF3, IMF4, dan IMF5, baik untuk *inphase* maupun *quadrature*. Hasil rekonstruksi dari penjumlahan ketiga IMF tersebut dapat dilihat pada Gambar 4.12.



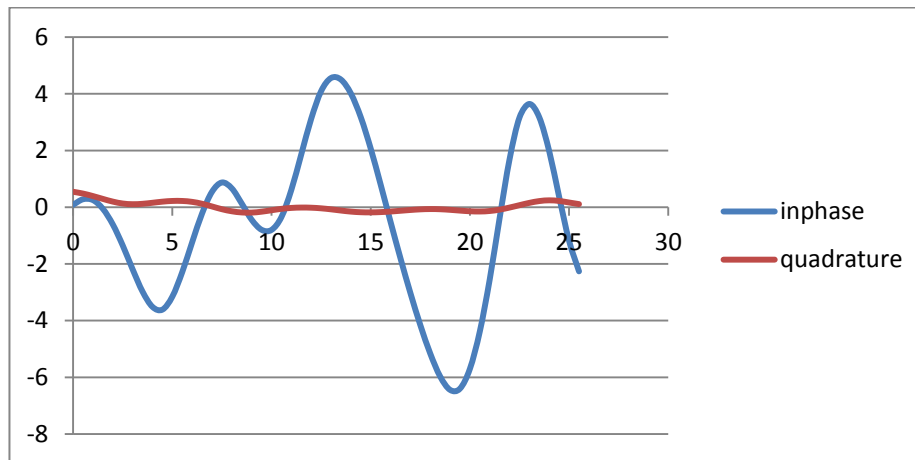
Gambar 4.12 Hasil rekonstruksi data lapangan VLF-EM *line 6*

➤ **Line 7**



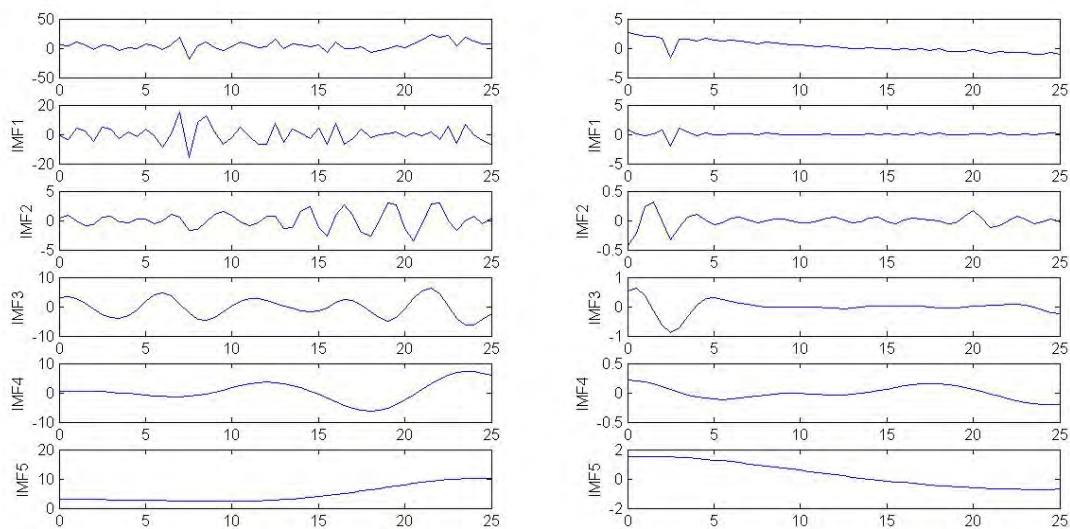
Gambar 4.13 Hasil dekomposisi menggunakan NA-MEMD untuk data *inphase* (kiri) dan *quadrature* (kanan) *line 7*

Pada *line 7*, mode yang diambil adalah IMF3 dan IMF4, baik untuk *inphase* maupun *quadrature*. Hasil penjumlahan kedua IMF untuk masing-masing *phase* dapat dilihat pada Gambar 4.14.



Gambar 4.14 Hasil rekonstruksi data lapangan VLF-EM *line 7*

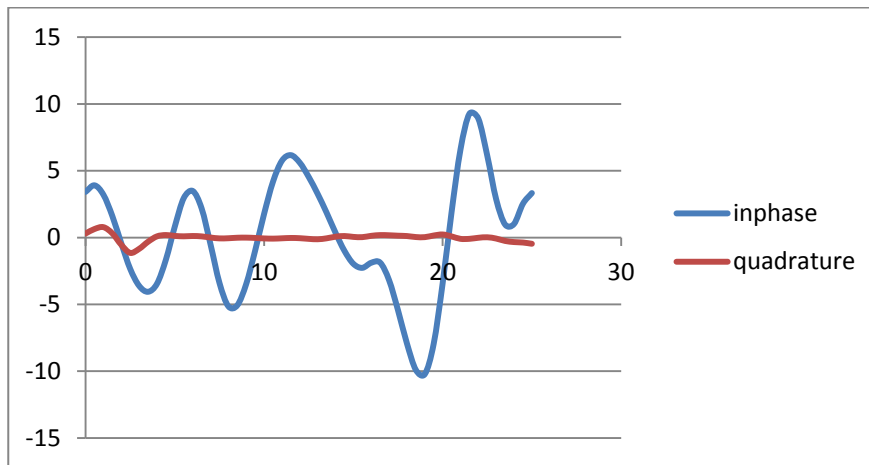
#### ➤ *Line 8*



Gambar 4.15 Hasil dekomposisi menggunakan NA-MEMD untuk data *inphase* (kiri) dan *quadrature* (kanan) *line 8*

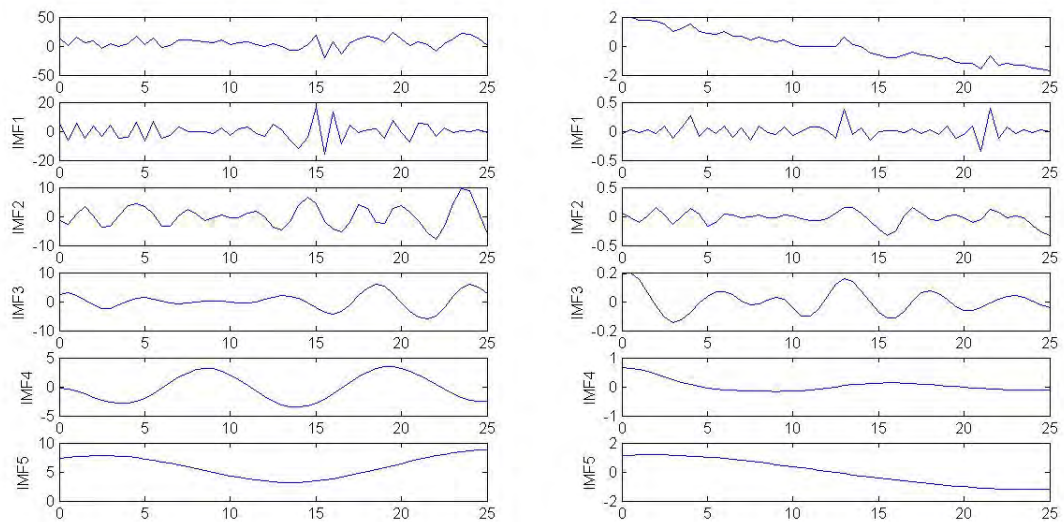
Mode yang diambil pada *line 8* ini adalah IMF3 dan IMF4 untuk *inphase* serta IMF2, IMF3, dan IMF4 untuk *quadrature*. Hasil rekonstruksinya dapat dilihat dalam Gambar 4.16.





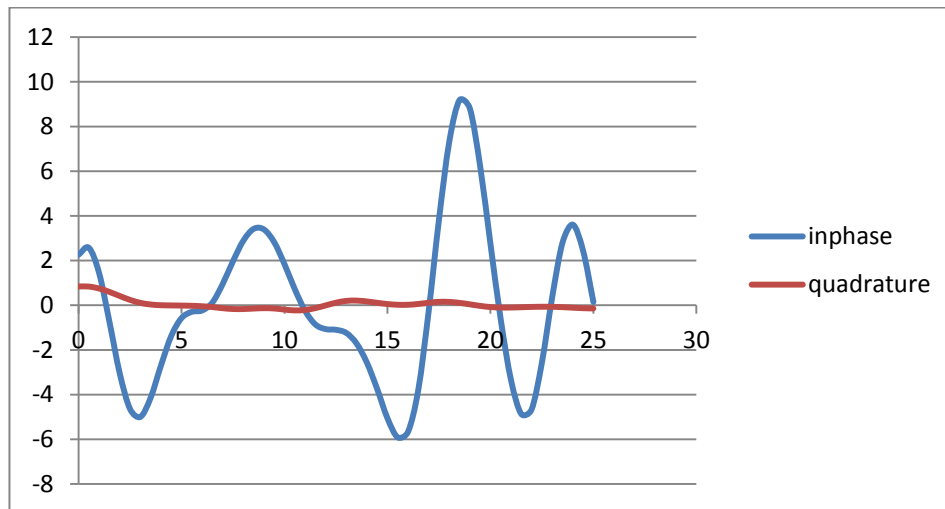
Gambar 4.16 Hasil rekonstruksi data lapangan VLF-EM *line 8*

➤ **Line 9**



Gambar 4.17 Hasil dekomposisi menggunakan NA-MEMD untuk data *inphase* (kiri) dan *quadrature* (kanan) *line 9*

Pada *line 9*, mode yang diambil adalah IMF3, IMF4, dan IMF5, baik untuk *inphase* maupun *quadrature*. Hasil penjumlahan ketiga mode tersebut untuk masing-masing *phase* dapat dilihat pada Gambar 4.18.



Gambar 4.18 Hasil rekonstruksi data lapangan VLF-EM *line 9*

## 4.2 Analisis, Interpretasi dan Pembahasan Data Lapangan

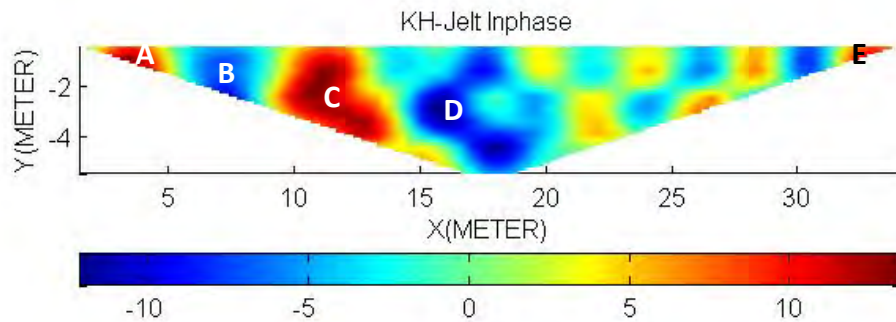
Data mentah yang diperoleh dari lapangan setelah melalui *filtering* NA-MEMD selanjutnya diproses menggunakan Karous-Hjelt untuk memperoleh penggambaran anomali dangkal. Berdasarkan hasil *filtering* NA-MEMD terlihat bahwa data *quadrature* memiliki amplitudo gelombang yang jauh lebih kecil dibandingkan dengan data *inphase* sehingga data *inphase* lebih sensitif terhadap adanya anomali dibandingkan dengan data *quadrature*. Oleh karena itu, penggambaran Filter Karous-Hjelt untuk interpretasi kualitatif hanya dilakukan pada data *inphase*.

Hasil *filtering* NA-MEMD dari data lapangan juga diinterpretasikan secara kuantitatif, yaitu dengan melakukan inversi dari data *tipper* (*inphase* dan *quadrature*) menggunakan *software* *Inv2DVLf-v1*. Masing-masing lintasan (*line*) diproses sebanyak 100 kali iterasi dan model resistivitas awal sebesar 120  $\Omega\text{m}$ . Konstrain inversi berupa parameter *Lagrange* sebesar 0.7. Hasil inversi tersebut selanjutnya diproses menggunakan *software* *Surfer 9* untuk menggambarkan kontur anomalinnya.

Berikut penggambaran hasil Filter Karous-Hjelt sebagai interpretasi kualitatif dan inversi yang telah dikonturkan menggunakan *Surfer 9* sebagai interpretasi kuantitatif beserta pembahasan pada masing-masing lintasan (*line*).

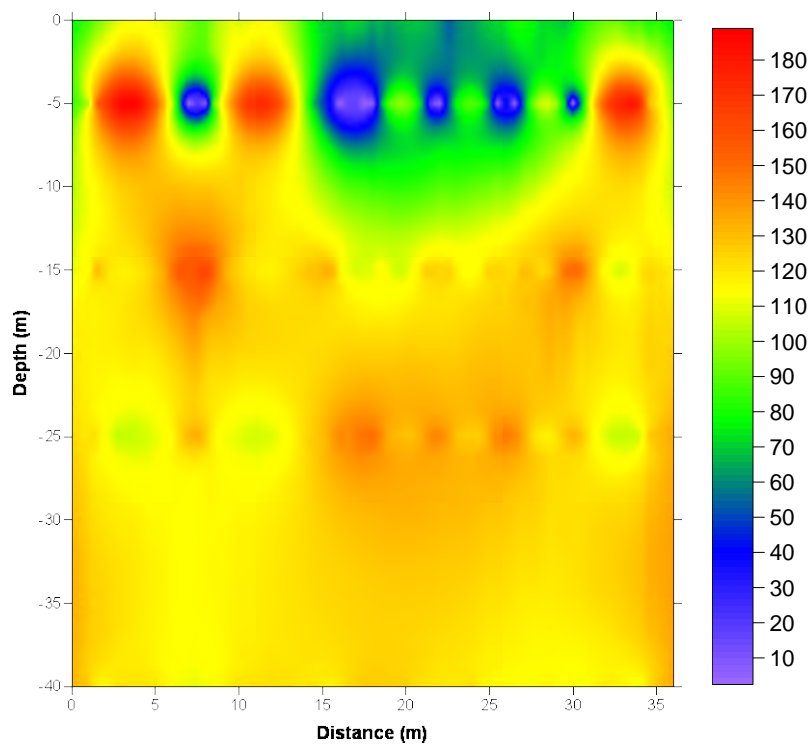


➤ *Line 1*



Gambar 4.19 Hasil Filter Karous-Hjelt *inphase line 1*

Pada Gambar 4.19 teridentifikasi sebanyak lima anomali yang terdiri atas tiga anomali resistif dan dua anomali konduktif. Anomali resistif ditunjukkan oleh nilai positif pada skala densitas arus, sedangkan anomali konduktif ditunjukkan oleh nilai negatif. Pada gambar tersebut anomali resistif adalah A,C, dan E, sedangkan anomali konduktif adalah B dan D. Hasil Karous-Hjelt *line 1* ini selanjutnya dicocokkan dengan hasil inversi yang dapat dilihat pada Gambar 4.20.



Gambar 4.20 Hasil inversi *line 1*

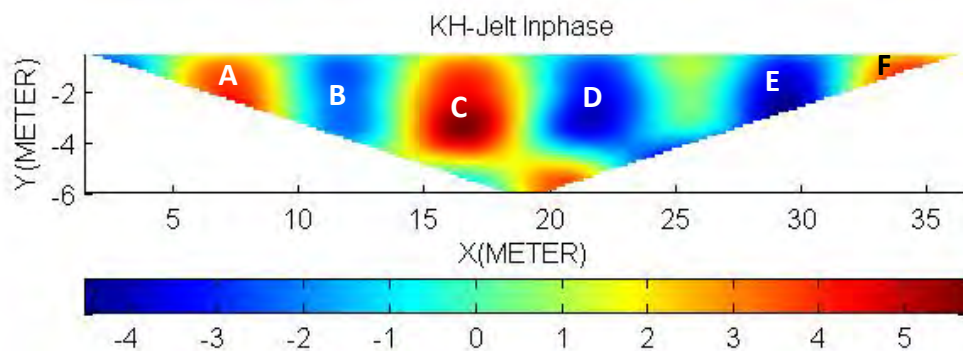
Hasil inversi untuk *line 1* menghasilkan profil struktur bawah permukaan tanah seperti pada Gambar 4.20. Nilai rms yang mencerminkan seberapa besar *error* data adalah 1,49. Berdasarkan gambar tersebut terlihat bahwa pada kedalaman 0 sampai 5 meter teridentifikasi anomali resistif pada jarak 0-5 meter, 10-15 meter, dan 30-35 meter. Anomali ini diperkirakan adalah batuan andesit dengan resistivitas berkisar 140-200  $\Omega\text{m}$  (Telford, 1990), sedangkan pada kedalaman 5-40 meter didominasi oleh material dengan resistivitas tinggi juga, yaitu 140-200  $\Omega\text{m}$ . Hal ini menunjukkan bahwa diperkirakan bawah permukaan tanah pada lintasan 1 didominasi oleh adanya batuan berukuran besar. Kedalaman penetrasi yang terlihat pada profil struktur bawah permukaan tanah Gambar 4.20 adalah 40 meter. Hal ini merujuk pada persamaan 2.18 dimana frekuensi yang direkam oleh alat VLF-EM di lapangan sebesar 19,8 KHz dan *initial resistivity* sebesar 120  $\Omega\text{m}$  berdasarkan acuan bahwa resistivitas batuan andesit sekitar 100-200  $\Omega\text{m}$  (Telford, 1990) karena sebagian besar batuan candi merupakan batuan andesit.

Pada kedalaman 0 sampai 15 meter terlihat bahwa selain ada anomali resistif yang telah disebutkan tadi, terdapat pula anomali konduktif pada kedalaman 5 meter sebanyak lima anomali, yaitu pada jarak profil sekitar 7-8 meter dan empat anomali lainnya pada jarak antara 15-30 meter. Lima anomali tersebut diwakili oleh bentuk berwarna ungu dengan resistivitas berdasarkan skala sebesar 0-50  $\Omega\text{m}$ . Anomali ini diperkirakan adalah tanah lempung basah karena menurut Telford (1990) resistivitas tanah lempung berkisar 1-100  $\Omega\text{m}$ . Pada Gambar 4.20 terlihat pula daerah sekitar selain anomali resistif dan konduktif adalah daerah yang berwarna hijau dengan resistivitas berdasarkan skala sebesar 60-100  $\Omega\text{m}$ . Daerah ini diperkirakan merupakan tanah lempung biasa yang bercampur dengan pasir.

Berdasarkan hasil analisa inversi *line 1* ini sebagian besar sudah cocok dengan hasil Filter Karous-Hjelt pada Gambar 4.19. Hanya saja kontur yang dihasilkan dari Karous-Hjelt hanya sampai pada kedalaman 6 meter. Kedalaman kontur keluaran Karous-Hjelt dipengaruhi oleh besarnya spasi antartitik dalam pengukuran di lapangan. Semakin kecil spasi antartitik, maka semakin kecil pula

kedalaman kontur yang dihasilkan dari hasil Filter Karous-Hjelt. Tetapi dalam perekaman data VLF-EM di Candi Gambar Wetan ini sekali lagi mengacu pada kondisi fisik bangunan candi, serpihan batuan, maupun arca-arca yang telah ditemukan ada yang berukuran paling kecil sekitar 0,5 meter dan ditunjang bahwa untuk perekaman data VLF-EM, semakin rapat jarak antartitik maka semakin detail hasilnya. Ini dibuktikan oleh hasil pengukuran sebelumnya menggunakan spasi antartitik sebesar 1 meter ternyata rms (*error data*) lebih besar daripada data yang menggunakan spasi antartitik sebesar 0,5 meter. Pada akhir pembahasan *line 1* sampai *line 9*, ada pula pembahasan untuk spasi antartitik 1 meter.

#### ➤ **Line 2**

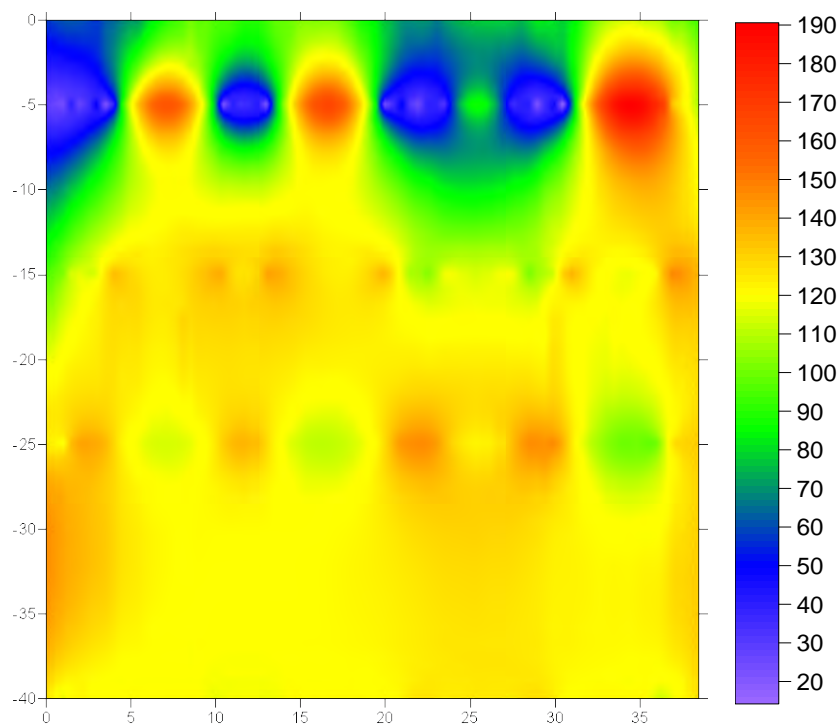


Gambar 4.21 Hasil Filter Karous-Hjelt *inphase line 2*

Hasil pengolahan Filter Karous-Hjelt pada *line 2* terlihat pada Gambar 4.21 dan dapat diidentifikasi terdapat enam anomali. A, C, dan F adalah anomali resistif (densitas arus bernilai positif). B, D, dan E adalah anomali konduktif (densitas arus bernilai negatif). Sama seperti *line 1*, hasil Filter Karous-Hjelt ini kemudian dicocokkan dengan hasil inversi yang dapat dilihat pada Gambar 4.22.

Gambar 4.22 merupakan hasil inversi untuk *line 2* dengan rms sebesar 0,56. Pada kedalaman 0-6 meter terdapat tiga anomali resistif yang terletak pada jarak profil yang sama dengan hasil Karous-Hjelt, yaitu pada jarak profil 5-10 meter, 15-20 meter, dan 33-37 meter. Dengan melihat warna kontur anomali berdasarkan skala resistivitas maka ketiga anomali resistif tersebut memiliki resistivitas berkisar 160-190  $\Omega\text{m}$ . Bagian ini diduga merupakan bongkahan batuan

yang terletak pada bawah permukaan dangkal. Selain itu, pada kedalaman yang sama, terdapat pula anomali konduktif pada jarak profil 0-5 meter, 10 meter, dan 20-30 meter. Letak anomali konduktif ini juga berada pada jarak profil yang sama seperti hasil Filter Karous-Hjelt. Anomali konduktif tersebut memiliki resistivitas sekitar 0-60  $\Omega\text{m}$ . Diduga bagian ini merupakan tanah lempung basah. Sedangkan bagian yang berwarna hijau yang memiliki resistivitas 70-90  $\Omega\text{m}$  diperkirakan merupakan tanah lempung biasa yang bercampur pasir.

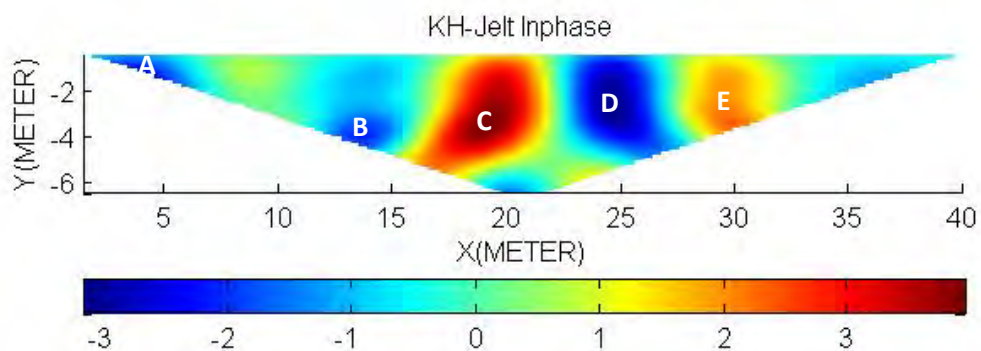


Gambar 4.22 Hasil inversi *line 2*

Pada kedalaman 0-40 meter pada *line 2* ini hampir sama dengan *line 1*, yaitu didominasi oleh material resistif dengan nilai resistivitas berkisar 130-160  $\Omega\text{m}$  dan ada empat titik pada kedalaman 25 meter memiliki resistivitas sekitar 180  $\Omega\text{m}$ , hampir sama dengan anomali resistif yang muncul pada kedalaman 5 meter. Dilihat dari segi bentuk anomali pada kedalaman 5-40 meter untuk *line 1* dan *line 2* bentuknya hampir sama, yaitu didominasi material resistif dengan beberapa titik memiliki resistivitas lebih tajam dan terdapat beberapa bagian yang berwarna hijau sebanyak tiga buah dimana kontur berwarna hijau memiliki resistivitas 70-

100  $\Omega\text{m}$  yaitu pada kedalaman 25 meter. Diduga pada bawah permukaan *line 1* dan *line 2* terdapat semacam susunan batuan besar besar karena spasi antara lintasan 1 dan 2 sebesar 1 meter serta sepanjang jarak profil pengukuran menghasilkan kontur yang hampir sama pada kedalaman 5-40 meter.

➤ **Line 3**

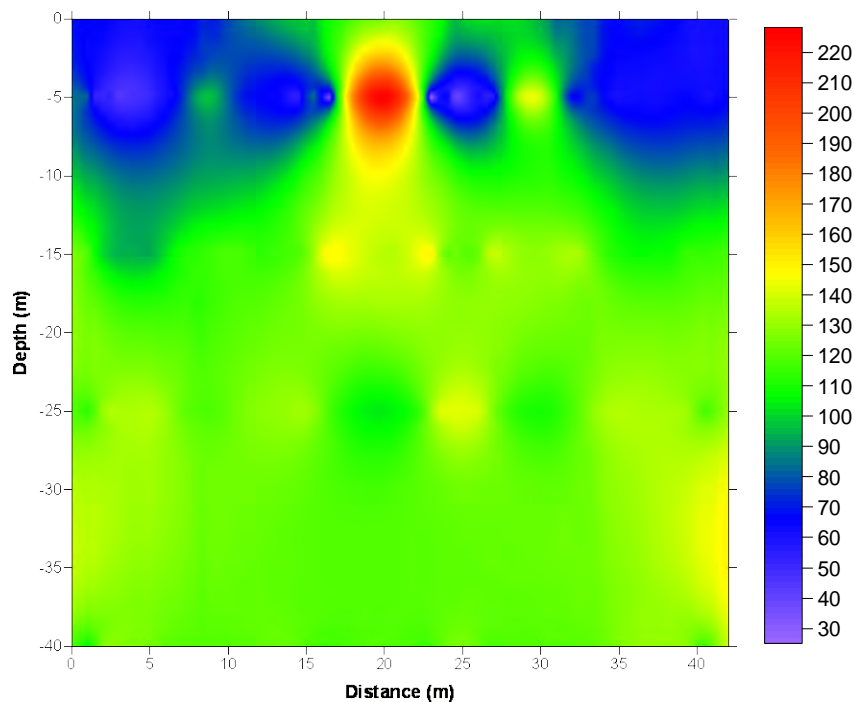


Gambar 4.23 Hasil Filter Karous-Hjelt *inphase line 3*

Hasil Filter Karous-Hjelt untuk *line 3* dapat dilihat pada Gambar 4.23. Pada gambar tersebut bisa diidentifikasi lima anomali. A, B, dan D merupakan anomali konduktif (densitas arus bernilai negatif), sedangkan C dan E merupakan anomali resistif (densitas arus bernilai positif). Namun ketajaman anomali yang terlihat pada kontur tersebut berbeda, baik untuk anomali konduktif maupun resistif. Bagian anomali konduktif D lebih tajam daripada bagian A dan B. Begitu pula anomali resistif C lebih tajam daripada E. Hasil Filter Karous-Hjelt ini selanjutnya dicocokkan dengan hasil inversi pada Gambar 4.24.

Hasil inversi untuk *line 3* pada Gambar 4.24 memiliki rms sebesar 0,34. Pada kedalaman 0-6 meter terlihat adanya anomali resistif pada jarak profil sekitar 16-23 meter dengan nilai resistivitas 200-220  $\Omega\text{m}$ . Hal ini cocok dengan hasil Filter Karous-Hjelt yaitu anomali yang ditunjukkan oleh simbol C pada Gambar 4.23. Selain itu, berdasarkan hasil inversi pada jarak profil 30 meter juga terdapat sebuah titik dengan resistivitas 150-160  $\Omega\text{m}$ . Hal ini juga cocok dengan anomali yang ditunjukkan oleh Filter Karous-Hjelt yang diwakili oleh bagian E. Hal ini bisa menjelaskan penyebab anomali resistif bagian C pada Filter Karous-Hjelt

lebih tajam daripada bagian E dikarenakan nilai resistivitas bagian C memang lebih besar daripada E walaupun keduanya sama-sama lebih resistif dari daerah sekitarnya di sepanjang *line 3*.

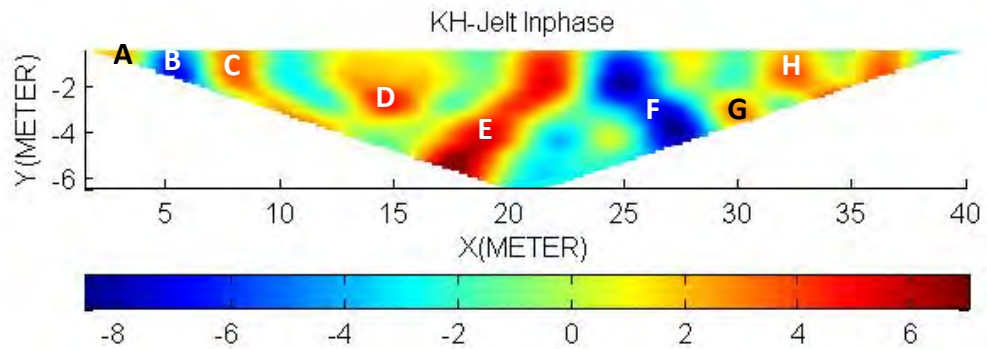


Gambar 4.24 Hasil inversi *line 3*

Selain anomali resistif, pada Gambar 4.24 terlihat pula terdapat material yang sangat konduktif pada jarak profil 0-17 meter, 23-26 meter, dan 32-42 meter. Material ini memiliki nilai resistivitas berkisar 0-60  $\Omega\text{m}$ . Diperkirakan bagian ini adalah tanah lempung basah yang sangat konduktif yang berada pada kedalaman 0-10 meter.

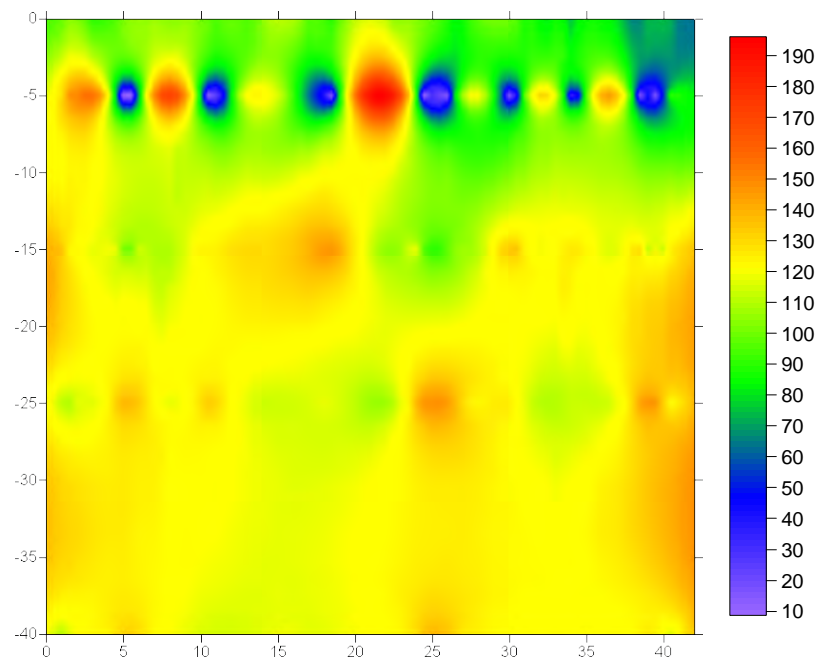
Pada kedalaman 10-40 meter untuk *line 3* jauh berbeda dengan *line 1* dan *line 2*. Pada *line 3* ini didominasi oleh material dengan resistivitas sekitar 90-100  $\Omega\text{m}$  dengan beberapa titik memiliki resistivitas 130-140  $\Omega\text{m}$ . Diduga, bagian bawah permukaan sepanjang *line 3* pada kedalaman 5-40 meter ini didominasi oleh tanah lempung kering bercampur pasir biasa.

➤ **Line 4**



Gambar 4.25 Hasil Filter Karous-Hjelt *inphase line 4*

Berdasarkan hasil Filter Karous-Hjelt pada Gambar 4.25 teridentifikasi sebanyak 8 anomali, yaitu 6 anomali resistif dengan densitas arus bernilai positif (A,C,D,E,G,H) dan 2 anomali konduktif dengan densitas arus bernilai negatif (A,F). Anomali resistif bagian E terlihat lebih tajam daripada bagian resistif lainnya. Jumlah anomali yang terlihat pada *line 4* ini lebih banyak jika dibandingkan dengan jumlah anomali pada lintasan-lintasan sebelumnya. Hasil Filter Karous-Hjelt ini selanjutnya dicocokkan dengan hasil inversi.

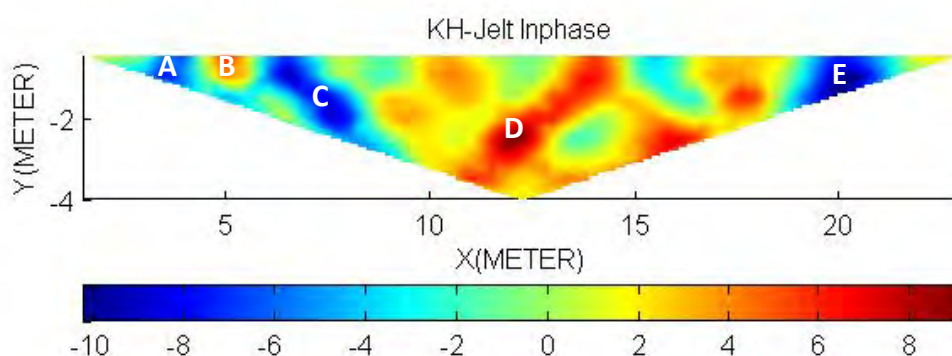


Gambar 4.26 Hasil inversi *line 4*

Hasil inversi untuk *line 4* seperti yang terlihat pada Gambar 4.26 memiliki rms sebesar 0,59. Pada kedalaman 0-5 meter terdapat beberapa titik yang mewakili anomali resistif dan konduktif. Pada jarak profil 0-4 meter, 8-10 meter, 20-25 meter, 33 meter, dan 37 meter terdapat bagian dengan resistivitas sekitar 170-190  $\Omega\text{m}$ . Selain itu, terdapat pula beberapa titik pada kedalaman yang sama yang merupakan bagian konduktif dengan nilai resistivitas sekitar 20-50  $\Omega\text{m}$ . Diduga material resistif tersebut merupakan bongkahan batuan andesit yang strukturnya sama dengan material pada lintasan-lintasan sebelumnya yang berada pada kedalaman yang sama pula, yaitu pada 0-5 meter. Sedangkan material konduktif tersebut juga sama seperti lintasan sebelumnya, yaitu tanah lempung basah.

Pada kedalaman 5-40 meter untuk *line 4* ini kembali didominasi oleh material dengan nilai resistivitas berkisar 130-160  $\Omega\text{m}$  dengan beberapa titik pada bagian resistif terlihat lebih tajam. Bagian di sekitar material konduktif dan resistif yang terlihat sebagai anomali pada Gambar 4.26 terlihat sebagai bagian berwarna hijau dengan resistivitas sebesar 70-100  $\Omega\text{m}$  diduga adalah tanah lempung kering bercampur pasian, sama seperti lintasan sebelumnya.

#### ➤ *Line 5*

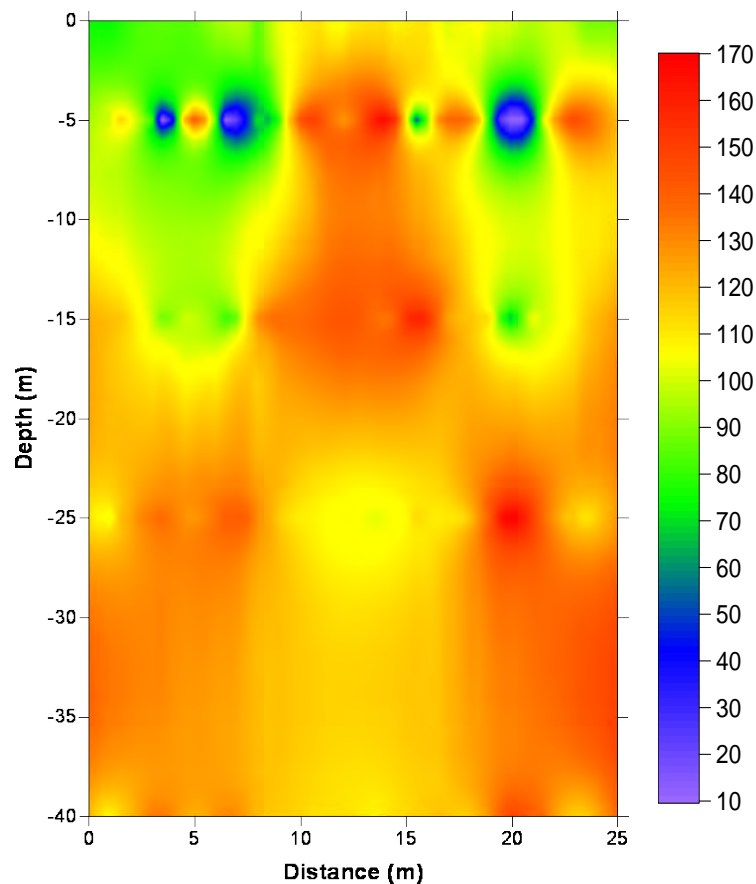


Gambar 4.27 Hasil Filter Karous-Hjelt *inphase line 5*

*Line 5* sampai dengan *line 9* merupakan *line* yang melintasi candi di area tempat pemujaan. Pada *line 5* terdapat lima anomali seperti yang terlihat dalam Gambar 4.27. Bagian B dan D merupakan anomali resistif (densitas arus bernilai



positif) sedangkan bagian A, C, dan E merupakan anomali konduktif (densitas arus bernilai negatif). Hasil ini kemudian dicocokkan dengan hasil inversi untuk *line 5* seperti pada Gambar 4.28 berikut.

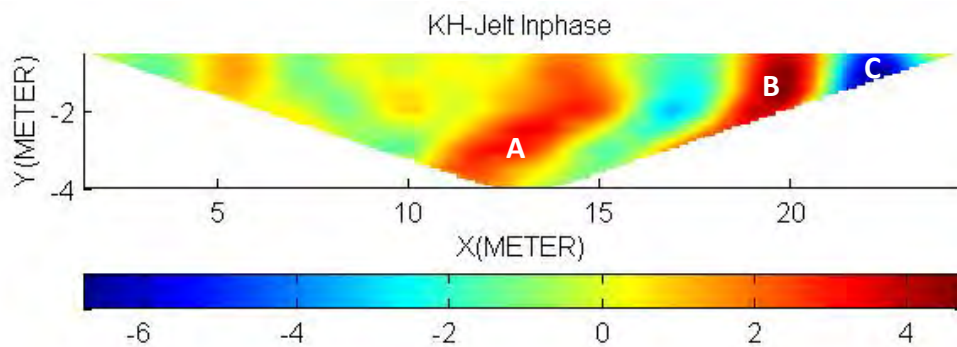


Gambar 4.28 Hasil inversi *line 5*

Hasil inversi *line 5* pada gambar 4.28 memiliki rms sebesar 1,27. Dalam gambar tersebut terlihat bahwa untuk kedalaman 0-5 meter terdapat tiga titik konduktif dengan resistivitas sebesar 30-40  $\Omega\text{m}$  pada jarak profil 3 meter, 7 meter, dan 21 meter yang diduga merupakan tanah lempung basah. Selain itu terlihat pula bagian yang sangat resistif pada jarak profil 10-18 meter dengan nilai resistivitas 150-170  $\Omega\text{m}$ . Bagian ini bersambung hingga kedalaman 40 meter sepanjang lintasan mulai dari jarak profil 0 hingga 25 meter. Diduga struktur bawah permukaan sepanjang *line 5* ini didominasi oleh material batuan andesit berukuran besar dengan resistivitas 140-170  $\Omega\text{m}$ . Bagian lain yang tampak pada

gambar berwarna hijau dengan resistivitas 60-90  $\Omega\text{m}$  diperkirakan adalah tanah lempung bercampur pasir.

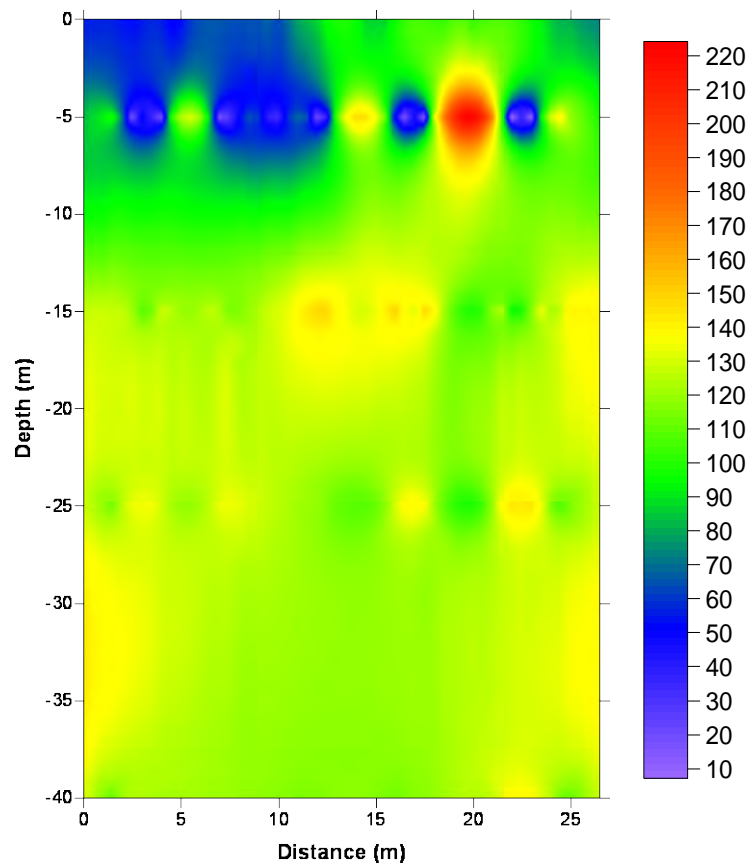
➤ **Line 6**



Gambar 4.29 Hasil Karous-Hjelt *inphase line 6*

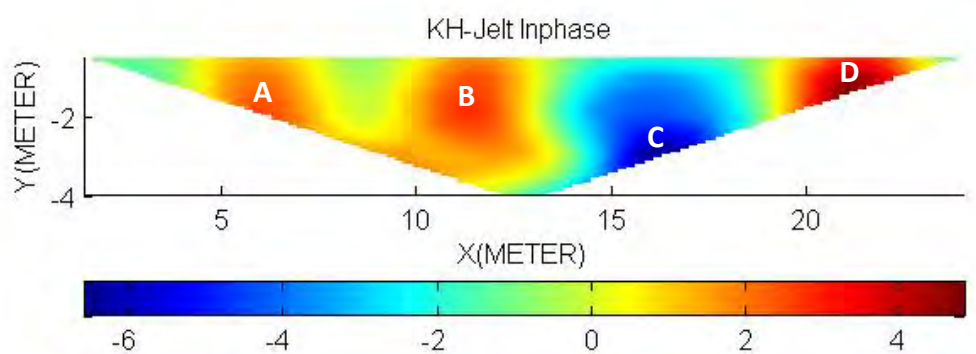
Pada Gambar 4.29 teridentifikasi sebanyak tiga anomali. A dan B merupakan anomali resistif (densitas arus bernilai positif). C merupakan anomali konduktif (densitas arus bernilai negatif). Hasil ini selanjutnya dicocokkan dengan hasil inversi pada gambar 4.30.

Hasil inversi untuk *line 6* pada Gambar 4.30 memiliki rms 0,54. Pada kedalaman 0-5 m terlihat adanya material dengan resistivitas sekitar 200-220  $\Omega\text{m}$  pada jarak profil 19-22 m. Diperkirakan material ini adalah batuan andesit. Selain itu pada jarak profil 0-12 m nampak adanya material yang lebih konduktif, yaitu resistivitasnya 30-60  $\Omega\text{m}$ . Diduga ini merupakan material tanah lempung basah. Pada kedalaman 5-40 meter didominasi oleh material yang diwakili warna hijau dengan resistivitas 80-110  $\Omega\text{m}$ . Diperkirakan ini merupakan tanah lempung bercampur pasir, sama seperti *line* sebelumnya. Pada kedalaman 15 meter terdapat tiga titik dengan resistivitas 160-170  $\Omega\text{m}$  pada jarak profil 10-18  $\Omega\text{m}$ . selain itu, pada kedalaman 25 meter dan jarak profil 23 meter juga terdapat sebuah titik dengan resistivitas yang sama, yaitu 160-170  $\Omega\text{m}$ . Hal ini menunjukkan bahwa ada material yang lebih resistif dibanding tanah di sekitarnya dan diduga ini merupakan batuan berukuran 0,5-1 meter yang terpendam dalam tanah.



Gambar 4.30 Hasil inversi *line 6*

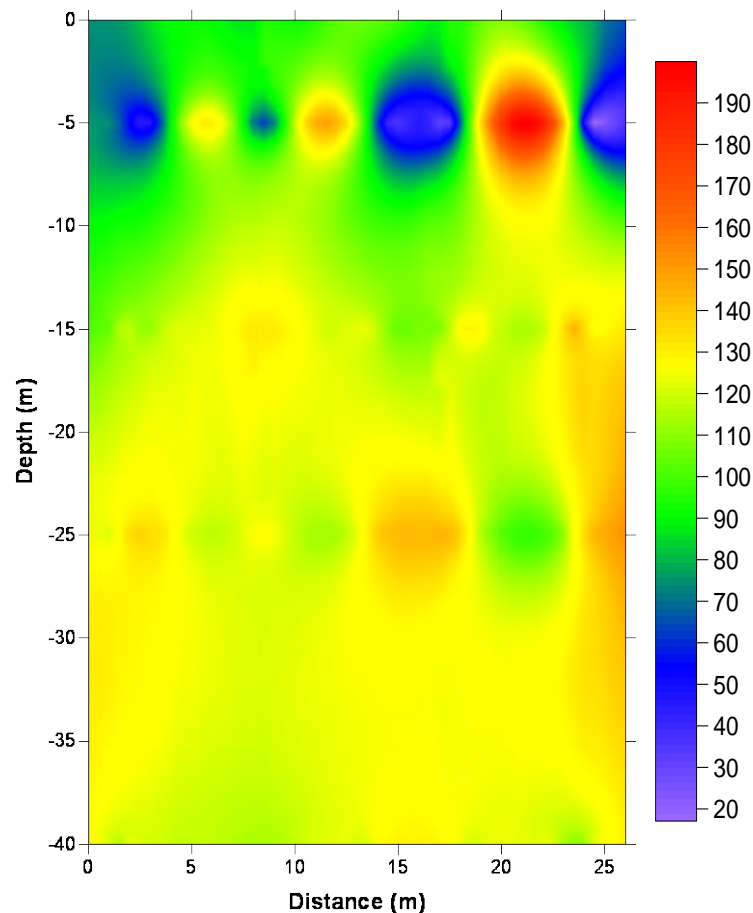
➤ **Line 7**



Gambar 4.31 Hasil Filter Karous-Hjelt *inphase line 7*

Hasil Filter Karous-Hjelt pada Gambar 4.31 terlihat ada empat anomali, yaitu tiga anomali resistif dan satu anomali konduktif. A, B, dan D adalah anomali resistif (densitas arus bernilai positif). C merupakan anomali konduktif (densitas

arus bernilai negatif). Pada gambar kontur anomali tersebut bagian D lebih tajam daripada A dan B walaupun sama-sama merupakan anomali resistif. Hal ini dapat disebabkan nilai resistivitasnya lebih besar. Untuk membuktikan hal ini, dapat dicocokkan dengan hasil inversi untuk *line 7* pada Gambar 4.32 berikut.



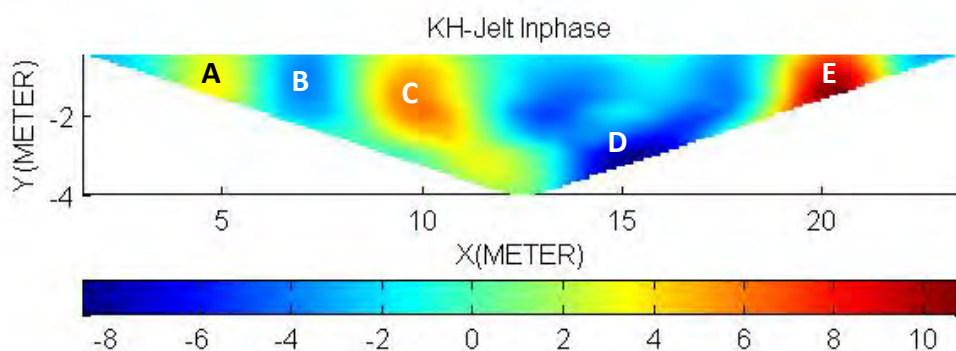
Gambar 4.32 Hasil inversi *line 7*

Hasil inversi pada Gambar 4.32 memiliki rms 0,71. Pada kedalaman 0-5 meter terlihat beberapa titik anomali resistif dan konduktif. Pada jarak profil 5-12 meter terdapat dua anomali resistif dengan nilai resistivitas 140-160  $\Omega\text{m}$ . Pada jarak profil 20-24 meter terdapat sebuah anomali resistif dengan nilai resistivitas 170-200  $\Omega\text{m}$ . Dilihat dari gambar kontur dan skala resistivitasnya terlihat bahwa material resistif pada jarak profil 20-24 meter ini merupakan bagian D pada hasil Filter Karous-Hjelt Gambar 4.31. Sedangkan bagian A dan B merupakan bagian

dengan resistivitas sebesar 140-160  $\Omega\text{m}$ . Hal ini yang menyebabkan bagian D nampak lebih tajam dibandingkan bagian A dan B. Ketiga anomali resistif ini diperkirakan merupakan batuan andesit. Pada kedalaman 0-5 meter juga terdapat bagian yang lebih konduktif dengan nilai resistivitas 20-60  $\Omega\text{m}$  yaitu pada jarak profil 1-3 meter, 8 meter, 15-18 meter, dan 25-26 meter. Bagian ini diduga merupakan material yang terdiri atas tanah lempung basah. Sedangkan bagian lainnya yang diwakili oleh warna hijau pada gambar kontur dengan nilai resistivitas 80-100  $\Omega\text{m}$  diperkirakan merupakan tanah lempung bercampur pasir.

Pada kedalaman 5-40 meter terlihat adanya beberapa titik yang memiliki resistivitas lebih tinggi daripada sekitarnya yaitu pada kedalaman 25 meter dan jarak profilnya 13-17 meter dengan nilai resistivitas 150-160  $\Omega\text{m}$ . Selain itu, pada jarak profil 25 meter dan kedalaman 15-37 meter terdapat material dengan resistivitas yang sama, yaitu 150-160  $\Omega\text{m}$ . Daerah di sekitarnya didominasi oleh material dengan nilai resistivitas 110-130  $\Omega\text{m}$ . Berdasarkan adanya anomali yang terlihat pada gambar kontur, baik dangkal maupun dalam, diduga pada *line 7* ini terdapat beberapa batuan yang masih terpendam dalam tanah.

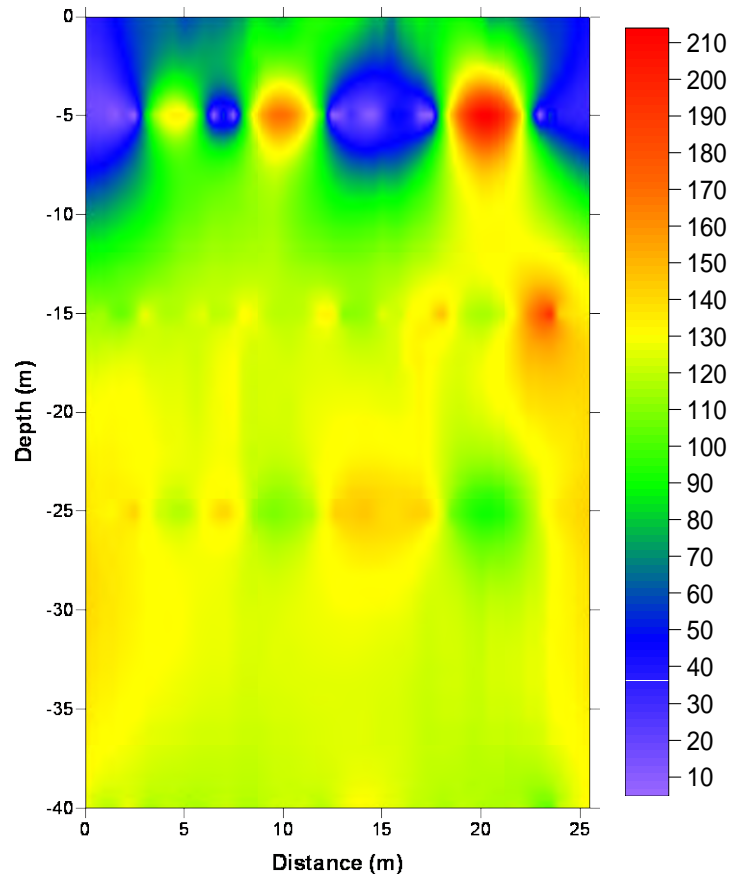
#### ➤ *Line 8*



Gambar 4.33 Hasil Filter Karous-Hjelt *inphase line 8*

Hasil Filter Karous-Hjelt *line 8* pada Gambar 4.33 memperlihatkan adanya 5 anomali, yaitu A, C, dan E anomali resistif (densitas arus bernilai positif), B dan

D anomali konduktif (densitas arus bernilai negatif). Hasil ini selanjutnya dicocokkan dengan hasil inversi pada Gambar 4.34.

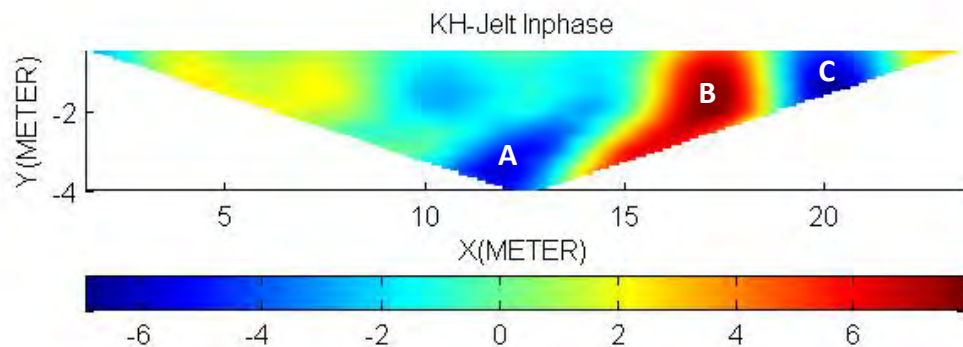


Gambar 4.34 Hasil inversi *line 8*

Hasil inversi untuk *line 8* ini memiliki rms sebesar 0,89. Pada kedalaman 5 meter terlihat tiga material yang lebih resistif terhadap daerah sekitarnya, yaitu pada jarak profil 5 meter, 10 meter, dan 20 meter. Untuk titik resistif pada jarak profil 5 meter memiliki nilai resistivitas 140-150  $\Omega\text{m}$ . Bagian ini diwakili oleh A pada hasil Karous-Hjelt gambar 4.33. Sedangkan dua titik resistif pada jarak profil 10 dan 20 meter memiliki resistivitas 190-210  $\Omega\text{m}$ . Bagian ini diwakili oleh C dan D pada hasil Filter Karous-Hjelt. Terlihat bahwa C dan D memiliki nilai resistivitas lebih tinggi daripada A sehingga pada hasil Filter Karous-Hjelt terlihat lebih tajam. Selain itu, pada kelaman 0-5 meter juga terlihat adanya anomali konduktif, yaitu pada jarak profil 0-2 meter, 7 meter, 13-18 meter, dan 25 meter dengan nilai resistivitas 0-60  $\Omega\text{m}$ . Hasil ini cocok dengan hasil Filter Karous-

Hjelt, hanya saja anomali konduktif untuk jarak profil bagian tepi kontur tidak terlihat pada Karous-Hjelt dikarenakan hasil keluaran K-Hjelt berbentuk segitiga menyempit di bagian kedua tepinya.

➤ **Line 9**



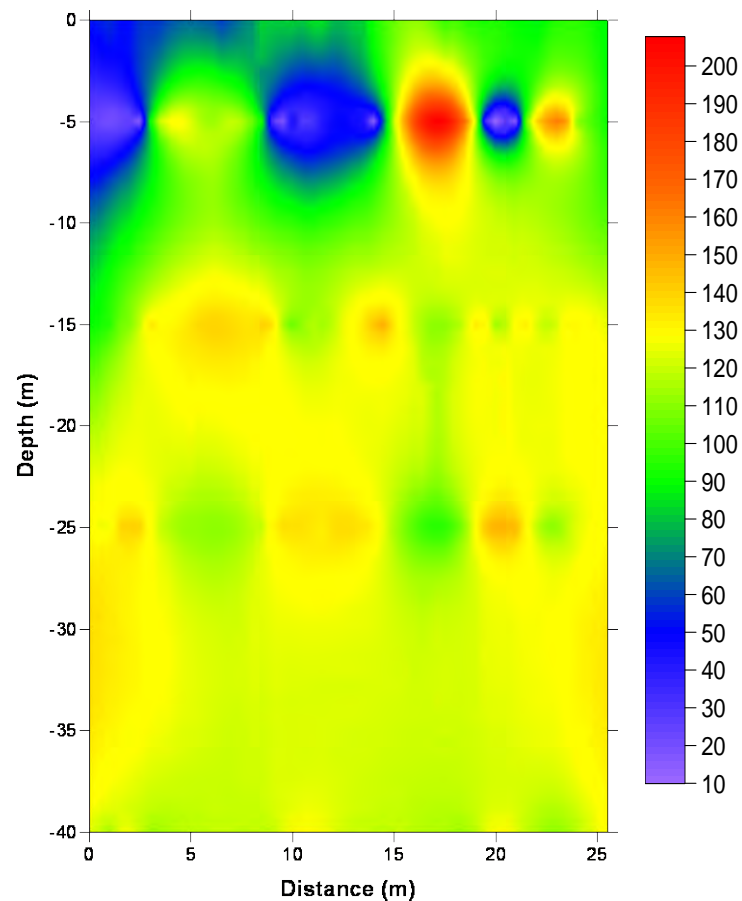
Gambar 4.35 Hasil Filter Karous-Hjelt *inphase line 9*

Pada Gambar 4.35 terlihat adanya tiga anomali, yaitu dua anomali konduktif (densitas arus bernilai negatif) dan satu anomali resistif (densitas arus bernilai positif). A dan C merupakan anomali konduktif, sedangkan B anomali resistif. Hasil ini dicocokkan dengan hasil inversi pada gambar 4.36.

Hasil inversi untuk *line 9* pada gambar 4.36 memiliki rms sebesar 0,82. Pada kedalaman 0-5 meter terlihat adanya anomali resistif pada jarak profil 15-18 meter dengan nilai resistivitas 190-210  $\Omega\text{m}$ . Bagian ini cocok dengan hasil Filter Karous-Hjelt pada Gambar 4.35 yaitu bagian B. Diduga material ini merupakan batuan andesit yang terpendam dalam tanah. Ada pula titik resistif pada jarak profil 24 meter dengan resistivitas 160-170  $\Omega\text{m}$ . Selain itu, terdapat pula material yang lebih konduktif dibandingkan sekitarnya yaitu pada jarak profil 0-2 meter, 10-13 meter, dan 20 meter dengan resistivitas 20-60  $\Omega\text{m}$ . Bagian ini diwakili oleh A dan C pada kontur Karous-Hjelt. Sedangkan anomali konduktif dan resistif pada tepi kontur inversi tidak terlihat pada K-Hjelt, sama seperti *line 8* dikarenakan keluaran K-Hjelt berbentuk segitiga menyempit di kedua tepinya. Bagian lainnya untuk kedalaman 0-5 meter selain material yang lebih resistif dan konduktif, ada daerah yang diwakili oleh warna hijau pada kontur hasil inversi

dengan nilai resistivitas 80-100  $\Omega\text{m}$  yang diperkirakan daerah ini merupakan tanah lempung bercampur pasir.

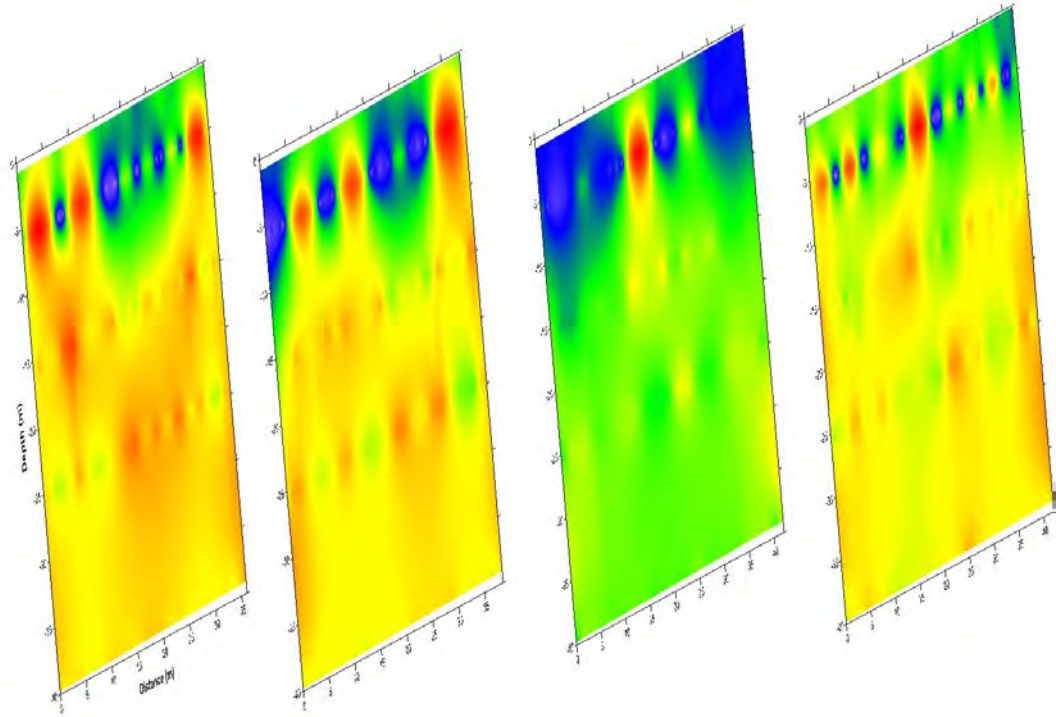
Pada kedalaman 5-40 meter terdapat lima titik yang lebih resistif dibandingkan daerah sekitarnya, yaitu pada kedalaman 15 meter dengan jarak profil 5-10 meter dan 14-15 meter, kedalaman 25 meter dengan jarak profil 10-14 meter dan 20-21 meter; kedalaman 25-36 meter dengan jarak profil 0-3 meter. Semuanya memiliki nilai resistivitas 150-180  $\Omega\text{m}$ . Diduga material tersebut merupakan batuan andesit yang masih terpendam dalam tanah.



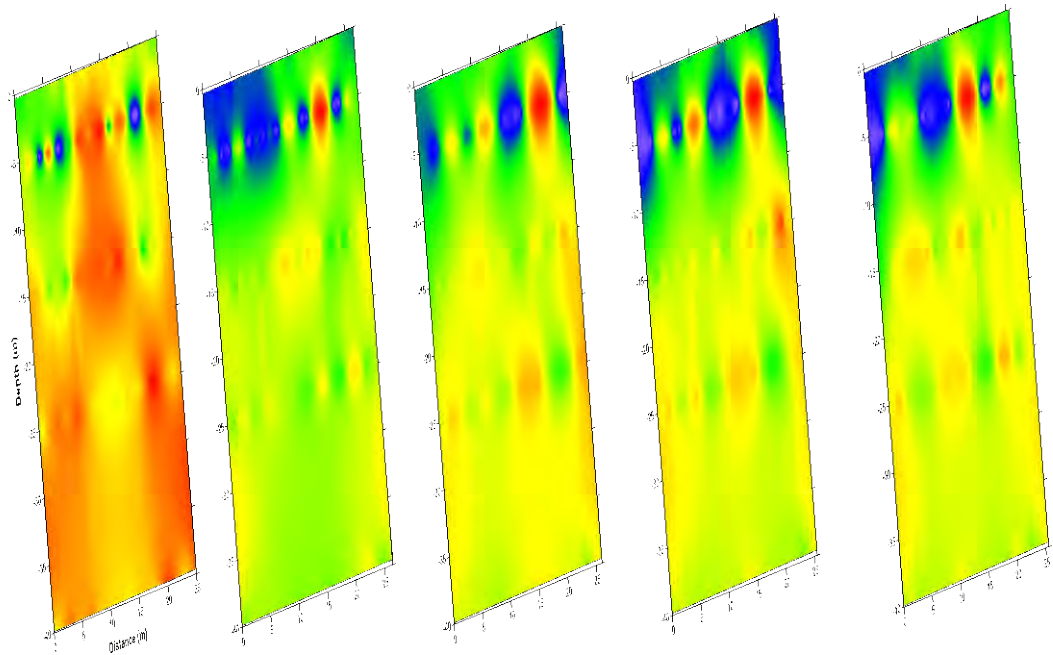
Gambar 4.36 Hasil inversi *line 9*



Hasil penggambaran inversi lintasan 1 sampai lintasan 9 yang berada di area berbeda dapat digambarkan sebagai berikut:



Gambar 4.37 Hasil inversi *line 1- 4* (melintasi batuan candi yang terlihat sebagian)



Gambar 4.38 Hasil inversi *line 5-9* (melintasi bangunan candi yang utuh)

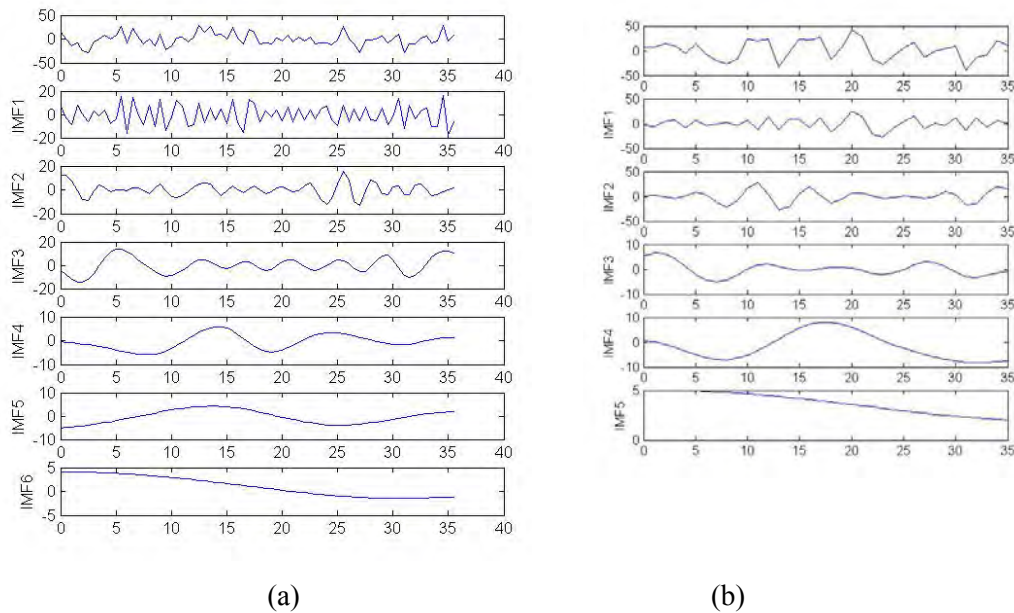
Selain pengambilan data sebanyak sembilan lintasan dengan spasi antartitik sebesar 0,5 m dan spasi antarlintasan sebesar 1m, sebelumnya telah dilakukan juga pengambilan data dengan spasi antartitik sebesar 1m dan spasi antarlintasan sebesar 2m sebanyak 6 lintasan. Hasilnya menunjukkan bahwa sebagian besar rms (*error*) pada spasi antartitik 1 m lebih besar daripada rms untuk spasi antartitik 0,5 m.

Berikut ini adalah perbandingan rms untuk spasi antartitik 0,5 m (spasi antarlintasan 1 m) dan spasi antartitik 1 m (spasi antarlintasan 2 m).

Tabel 4.1: Perbandingan rms spasi antartitik 0,5m dengan spasi antartitik 1m

<i>Line ke-</i>	<b>rms</b>	
	<b>Spasi antartitik 0,5 m Spasi antarlintasan 1m</b>	<b>Spasi antartitik 1 m Spasi antarlintasan 2m</b>
<b>1</b>	1,49	1,13
<b>2</b>	0,56	3,38
<b>3</b>	0,34	2,48
<b>4</b>	0,59	1,24
<b>5</b>	1,27	1,61
<b>6</b>	0,54	0,63
<b>7</b>	0,71	
<b>8</b>	0,89	
<b>9</b>	0,82	

Berdasarkan tabel 4.1 di atas terlihat bahwa rms (*error data*) untuk spasi antartitik 0,5 meter lebih kecil daripada spasi antartitik 1 meter, kecuali untuk *line 1*. Pada *line 1* terlihat bahwa rms untuk spasi antartitik 0,5 meter sebesar 1,49 sedangkan spasi antartitik 1 meter sebesar 1,13. Hal ini dapat dijelaskan melalui Gambar 4.39 berikut.



Gambar 4.39 Hasil penguraian sinyal oleh NA-MEMD untuk *inphase line 1*

(a) Spasi antartitik 0,5 m ; spasi antarlintasan 1 m

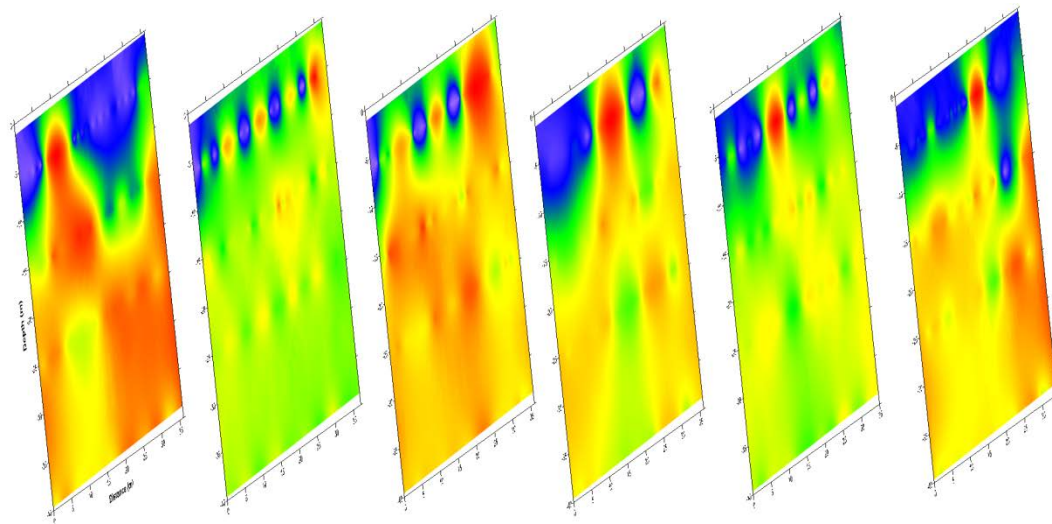
(b) Spasi antartitik 1 m ; spasi antarlintasan 2 m

Pada Gambar 4.39 menunjukkan hasil penguraian sinyal oleh NA-MEMD. Sinyal asli yang direkam oleh alat VLF-EM ditunjukkan oleh bagian paling atas. Terlihat dengan jelas bahwa untuk Gambar 4.39a yang merupakan *inphase* untuk spasi antartitik 0,5 m eter memiliki bentuk gelombang sangat nonlinier dan nonstationer. Bentuk ini lebih rumit dan kompleks jika dibandingkan dengan Gambar 4.39b yang merupakan *inphase* untuk spasi antartitik 1 meter. Pada Gambar (a) sinyal diuraikan hingga IMF6. Terlihat bahwa sinyal asli dengan skala 50 kemudian diuraikan menjadi mode pertama pada IMF1 langsung terdekomposisi menjadi 20. Bahkan skala 20 ini muncul sampai IMF3. Hal ini jelas menunjukkan terjadinya *mode mixing*, yaitu adanya sebuah frekuensi yang muncul di beberapa *Intrinsic Mode Function* (IMF) sepanjang tiga IMF. Begitu pula untuk IMF4 dan IMF5 terjadi *mode mixing*. Berbeda dengan Gambar (b) dimana sinyal asli dengan skala 50 diuraikan menjadi IMF pertama tetap bernilai 50. Pada gambar ini juga terjadi *mode mixing* namun hanya sepanjang dua IMF, yaitu IMF1 dan IMF2 serta IMF3 dan IMF4. Hal inilah yang menyebabkan rms

untuk spasi antartitik 0,5 m pada *line 1* lebih besar, berbeda dengan *line* lainnya yang memiliki rms yang lebih kecil jika dibandingkan dengan spasi antartitik 1m.

Pengambilan data lapangan menggunakan metode VLF-EM yang merupakan metode pasif memang dapat menghasilkan data yang berbeda pada saat dilakukan pengukuran di waktu yang berbeda dikarenakan oleh berbagai macam medan magnet lain yang bisa muncul pada saat pengambilan data. Pengambilan data untuk spasi antartitik 1m dengan spasi antartitik 0,5m hanya berselang satu bulan dan di musim yang sama yaitu musim kemarau. Kondisi lapangan cukup panas dan banyak terjadi angin serta letak Candi Gambar Wetan sendiri berada tidak jauh dari Gunung Kelud yang merupakan gunung aktif (dari candi ke Gunung Kelud dapat ditempuh dengan berjalan kaki selama  $\pm 15$  menit). Tiga hal ini dapat mempengaruhi hasil perekaman data VLF-EM karena adanya *noise* yang berasal dari radiasi matahari, variasi diurnal medan elektromagnetik, yaitu pergerakan badai dari arah timur ke barat ditandai dengan banyaknya angin yang terjadi di lapangan, serta efek medan elektromagnetik yang ditimbulkan dari daerah vulkanik Gunung Kelud.

Hasil *resume* lintasan 1-6 untuk spasi antartitik sebesar 1m dan spasi antarlintasan sebesar 2m dapat dilihat pada Gambar 4.40 berikut ini.



Gambar 4.40 Hasil inversi spasi antartitik 1m (spasi antarlintasan 2m) untuk *line 1-6*

Hasil pengolahan data dan interpretasi keseluruhan tersebut didukung oleh hasil observasi kondisi lapangan bahwa area yang dipilih untuk akusisi data melintasi bagian batuan candi yang terlihat sebagian di permukaan tanah (Gambar 4.41).



(a)



(b)

Gambar 4.41. Kondisi geologi area untuk akusisi data

Halaman ini sengaja dikosongkan

## **BAB 5**

### **KESIMPULAN DAN SARAN**

#### **5.1. Kesimpulan**

Berdasarkan hasil akuisisi, pengolahan data, analisis, dan pembahasan maka diperoleh kesimpulan sebagai berikut:

1. Pada masing-masing lintasan (*line*) terdapat dua jenis anomali yang terdeteksi, yaitu anomali resistif yang memiliki nilai resistivitas lebih tinggi daripada daerah sekitar dan anomali konduktif yang memiliki resistivitas lebih rendah daripada daerah sekitarnya.
2. Anomali resistif yang teridentifikasi memiliki resistivitas 120-220  $\Omega\text{m}$  dan diperkirakan merupakan batuan andesit.
3. Anomali konduktif yang teridentifikasi memiliki resistivitas 1-60  $\Omega\text{m}$  dan diperkirakan merupakan tanah lempung basah.

Jadi, dengan menggunakan metode VLF-EM sebanyak 9 lintasan didapatkan bahwa struktur bawah permukaan tanah di sekitar Candi Gambar Wetan masih mengandung material resistif pada beberapa titik di setiap lintasan yang diduga merupakan batuan andesit yang masih terpendam di dalam tanah.

#### **5.2. Saran**

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, penulis berharap hasil yang diperoleh pada penelitian ini dapat menjadi sumber acuan untuk penelitian selanjutnya dalam penentuan letak area yang hendak dilakukan penggalian dalam upaya menemukan sedimen batuan candi atau arca yang masih terpendam dalam tanah.

Halaman ini sengaja dikosongkan



## DAFTAR PUSTAKA

- Aina, A. dan Emofurieta, W.O. (1991), "VLF Anomalies at Contacts between Precambrian Rocks in South-Western Nigeria", *Geoexploration*, Vol. 28, No. 1, hal. 55-65.
- Arcone, S.A. (1978), "Investigation of a VLF Airborne Resistivity Survey conducted in Northern Maine". *Geophysics*, Vol. 43, No. 7, hal. 1399–1417.
- Bahrie, A.S. Santoso, D. Paradimedja, D.D, Tofan RM, Santos, FM., 2008. Penerapan Metode VLF-EM-vGrad Untuk Memetakan Sungai Bawah Permukaan Daerah Karst. *Indonesian Scientific Karst*. Jogjakarta. 19-20 Agustus 2008.
- Baranwal, V.C. dan Sharma, S.P. (2006), "Integrated Geophysical Studies in the East-Indian Geothermal Province", *Pure and Applied Geophysics*, Vol. 163, No. 1, hal. 209–227.
- Bayrak, M., 2002. "Exploration of Chrome Ore in Southwestern Turkey by VLF-EM". *Journal of the Balkan Geophysical Society*, Vol. 5, No. 2, May 2002.
- De Groot-Hedlin C. dan Constable S. (1990), "Occam's Inversion to Generate Smooth, Two Dimensional Models for Magnetotelluric Data", *Geophysics*, Vol. 55, No. 12, hal. 1613-1624.
- Drahor, M.G. (2006), "Integrated Geophysical Studies in the Upper Part of Sardis Archaeological Site, Turkey", *Journal of Applied Geophysics*, Vol. 59, No. 3, hal. 205–223.
- Fraser, D.C. (1969), "Contouring of VLF-EM Data", *Geophysics*, Vol. 34, No. 6, hal. 958–967.
- Grandis, Hendra (2009), *Pengantar Pemodelan Inversi Geofisika*, Himpunan Ahli Geofisika Indonesia (HAGI).
- Huang, N.E., Shen, Z., Long, S.R., Wu, M.C.L., Shih, H.H., Zheng, Q., Yen, N.C., Tung, C.C. dan Liu, H.H. (1998), "The Empirical Mode Decomposition and the Hilbert Spectrum for Nonlinear and Non-Stationary Time Series Analysis", *Proceedings of the Royal Society A*, Vol. 454, No. 1971, hal. 903–995.
- Huang, J.R., Fan, S.Z., Abbod, M.F. Jen, K.K., Wu, J.F. dan Shieh, J.S. (2013), "Application of Multivariate Empirical Mode Decomposition and Sample Entropy in EEG Signals via Artificial Neural Networks for Interpreting Depth of Anesthesia", *Entropy*, Vol. 15, No. 9, hal. 3325–3339.
- Kalscheuer, T., Pedersen, L.B. dan Siripunvaraporn, W. (2008), "Radiomagnetotelluric Two-Dimensional Forward and Inverse Modelling Accounting for Displacement Currents", *Geophysics Journal International*, Vol. 175, No. 2, hal. 486-514.
- Karous, M. dan Hjelt, S.E. (1983), "Linear Filtering of VLF dip-angle Measurements", *Geophysical Prospecting*, Vol. 31, No. 5, hal. 782–794.
- Kwon, Y.B. dan Bang, H. (1996), *The Finite Element Method Using MATLAB*, FL : CRC Press, Boca Raton.

- Menke, W. (1984), *Geophysical Data Analysis: Discrete Inverse Theory*, Academic Press, San Diego.
- Paal, G. (1968), "Very Low Frequency Measurements in Northern Sweden", *Geoexploration*, Vol. 6, No. 3, hal. 141–149.
- Panduan Workshop Eksplorasi Geofisika Universitas Gajah Mada (UGM), 2011.
- Rehman, N. dan Mandic, D. P. (2011), "Filterbank Property of Multivariate Empirical Mode Decomposition", *IEEE Transactions on Signal Processing*, Vol. 59, hal. 2421–2426.
- Rehman, N., Mandic, D.P., Park, C. dan Huang, N.E. (2013), "EMD via MEMD: Multivariate Noise-Aided Computation of Standard EMD", *Advances in Adaptive Data Analysis*, Vol. 5, No. 2, hal. 1-25.
- Rodi, W. dan Mackie, R.L. (2001), "Nonlinear Conjugate Gradients Algorithm for 2-D Magnetotelluric Inversion", *Geophysics*, Vol. 66, No. 1, hal. 174-187.
- Roynold J. M., 1997. *An Introduction to Applied and Environmental Geophysics*, John Wiley and Sons Ltd., New York.
- Santos, Monteiro F.A., Antonio Mateus, Jorge Figueiras, Mario A. Goncalves, 2006. "Mapping Groundwater Contamination Around A Landfill Facility Using The VLF-EM Method- A Case Study". *Journal of Applied Geophysics*.
- Sharma, Prem V. 1997. *Environmental an Engineering Geophysics*. Cambridge University Press.
- Singh, K.B, Lokhande, R.D and Prakash, A.2004."Multielectrode Resistivity Imaging Technique For The Study Of Coal Seam". Central Mining Research Institute. *Journal of Scientific and Industrial Research*. Vol. 63. Pp 927-930
- Srigutomo, W., Harja, A., Sutarno, D. dan Kagiya, T. (2005), "VLF Data Analysis Through Transformation Into Resistivity Value: Application to Synthetic and Field Data", *Indonesian Journal of Physics*, Vol. 16, No. 4, hal. 127-136.
- Telford, W.M, and Geldart, L.P., (1990), *Aplied Geophysics*, Cambridge University Press, London.
- Watt GF. 1967. *Interpretation Theory in Applied Geophysics*. Mc Graw Hill Co, New York, San Fransisco, Toronto, London, Sydney.
- Zhdanov, M.S. (2002), *Geophysical Inverse Theory and Regularization Problems, Methods in Geochemistry and Geophysics*, Vol. 36, Elsevier, Amsterdam-Boston-London.
- Zlotnicki, J., Vargemezis, G., Mille, A., Bruere, F. dan Hammouya, G. (2006), "State of the Hydrothermal Activity of Soufriere of Guadeloupe Volcano Inferred by VLF Surveys", *Journal of Applied Geophysics*, Vol. 58, No. 4, hal. 265–279.